

Modellierung von
Sturmflutwasserständen in der Tideelbe

B3955.03.06.10006

Modellierung von Sturmflutwasserständen in
der Tideelbe

B3955.03.06.10006

Modellierung von Sturmflutwasserständen in der
Tideelbe

Auftraggeber: Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz
Schleswig-Holstein
Herzog-Adolf-Straße 1
25813 Husum

Auftrag vom: 4. Juli 2017, Az.: AZ

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. B3955.03.06.10006

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Küstenbereich
Referat: Ästuarsysteme II (K3)
Bearbeiter: Dr. rer. nat. E. Rudolph

Hamburg, 12.04.2018

Das Gutachten darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.

Zusammenfassung

Der Umweltsenator der Freien und Hansestadt Hamburg und die Umweltminister der Länder Niedersachsen und Schleswig-Holstein haben gemeinsam festgestellt, dass die länderübergreifende Zusammenarbeit im Küstenschutz zu intensivieren und entlang der Tideelbe ein gleichwertiges Schutzniveau anzustreben ist. Dazu haben Hamburg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein 2017 eine Absichtserklärung zur länderübergreifenden Harmonisierung der Deichbemessung an der Tideelbe sowie eine Kooperationsvereinbarung über die Ermittlung von Wasserständen zur Bemessung von Deichen an der Tideelbe unterzeichnet.

Im Rahmen dieser Kooperation wurde die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) beauftragt, entsprechende Modellierung mit Hilfe eines hochauflösenden numerischen Modells der Elbe zur Ermittlung der zur Bemessung heranzuziehenden Wasserstände in der Elbe von der Elbmündung bis zum Wehr Geesthacht durchzuführen.

Die vom Auftraggeber vorgegebene Wasserstandszeitreihe Cuxhaven (Elbe – km 725) für das Sturmflutszenario für den Referenzwasserstand (SFREF) beinhaltet die Springtide des 10. September 2006, den modifizierten Windstau der Sturmflut 3. Januar 1976 und die modifizierte Fernwelle des 18. Januar 1993 und weist hier einen maximalen Scheitelwert von NHN + 5,78 m auf. Das Sturmflutszenario für den Bemessungswasserstand enthält zusätzlich einen Klimazuschlag von 50 cm und erreicht somit NHN + 6,28 m (SFBEM). Der Windverlauf soll der Windentwicklung während der Sturmflut vom 3. Januar 1976 entsprechen. Als Abfluss der Elbe wird 2600 m³/s vorgegeben.

Nach diesen Vorgaben werden die Sturmflutwasserstände entlang der Tideelbe von der BAW mit einem hochauflösenden HN – Modell der Elbe ermittelt. Als Ergebnis der vorliegenden Untersuchung erhält man für SFREFQ2600 in Hamburg St. Pauli einen Sturmflutscheitelwasserstand von NHN + 7,62 m und für SFBEMQ2600 von NHN + 8,10 m. Die Bedeutung der Wahl des Abflusses in das Elbeästuar, des Windes über dem Elbeästuar und der Wasserstandsrandwerte am Rand zur Nordsee für die Höhe der Sturmflutscheitelwasserstände der Sturmflutszenarien SFREF und SFBEM entlang der Tideelbe ist im Rahmen einer Sensitivitätsuntersuchung dargestellt.

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
2	Unterlagen und Daten	2
3	Bearbeitungskonzept	4
4	Das mathematische Modell des Elbeästuares	6
4.1	Modelltopographie Planerischer Ist – Zustand PIZ02	6
4.2	Das numerische Verfahren UnTRIM	7
4.3	Modellgebiet	8
4.4	Gitternetz	8
4.5	Modellsteuerung	9
4.6	Sturmflutszenario 28. Januar 1994 – Vergleich Messung und Modellergebnisse	11
5	Wasserstände während der Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600	15
5.1	Wasserstandszeitreihen SFREFQ2600 und SFBEMQ2600	16
5.2	Wasserstandskenngrößen	18
5.3	Flächenhafte Darstellung des Sturmflutscheitelwasserstandes	19
5.4	Bedeutung des Abflusses für die Sturmflutscheitelwasserstände	23
6	Zusammenfassung der Ergebnisse	29
7	Literaturverzeichnis	31
8	Anhang	33
8.1	Rauheitsverteilung	33
8.2	Sensitivitätsstudie Salzgehaltsanfangsverteilung	35
8.3	Sensitivitätsstudie Wind über dem Elbeästuar	39
8.4	Sturmflutszenario SF94 – Vergleich Messung und Modellergebnisse in der Mittelelbe	45
8.5	Bedeutung des Abflusses für die Wasserstände in der Mittelelbe	48
8.6	Sensitivitätsstudie Rauheitsverteilung in der Mittelelbe	58
8.7	Teilgebiete: Modelltopographie Planerischer Ist – Zustand PIZ02	69

Bildverzeichnis	Seite
Bild 1: Ganglinie der Referenzflut für Cuxhaven (blau) für die Berechnung der Referenzwasserstände Elbe. Zusätzlich dargestellt sind die berücksichtigten Komponenten Springtide, Windstau und Fernwelle (Datum ohne Bedeutung).	4
Bild 2: Topographie des numerischen Modells des Elbeästuares der BAW für Sturmflutuntersuchungen (PIZ02) mit ausgewählten Pegelorten (Grundlage: Jahrespeilung 2010).	6
Bild 3: Längsprofil der auf NHN bezogenen Sohlage der Fahrrinnenachse in der Topographie des HN – Modells für den planerischen Ist – Zustand PIZ02 zwischen Elbe – km 755 und Elbe - km 550 (Bleckede).	7
Bild 4: Zeitliche Entwicklung der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung über der Elbe bei Scharhörn, Cuxhaven und Hamburg St. Pauli während der Sturmflut 3. Januar 1976 verwendet für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 modelliert vom DWD mit MKW.	10
Bild 5: SF94: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Bake A.	11
Bild 6: SF94: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Cuxhaven.	12
Bild 7: SF94: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Büsum.	12
Bild 8: SF94: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Brunsbüttel.	13
Bild 9: SF94: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Glückstadt.	13
Bild 10: SF94: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Hamburg St. Pauli.	14
Bild 11: SF94: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Bunthaus.	14
Bild 12: Wasserstandsverlauf Cuxhaven (Elbe – km 725) für die betrachteten Sturmflutszenarien: Vorgabe des Auftraggebers für das Sturmflutszenario SFREFQ2600 (Referenzkurve), Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 als Modellergebnis sowie der gemessene Wasserstandsverlauf in Cuxhaven während der Sturmflut 3. Januar 1976.	15
Bild 13: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios SFREFQ2600 entlang der Elbe bei Cuxhaven (Elbe – km 725), Brunsbüttel (Elbe – km 696), Glückstadt (Elbe – km 675), Schulau (Elbe – km 641), Hamburg St. Pauli (Elbe – km 623N), Zollenspieker (Elbe – km 598) und Geesthacht (Elbe – km 585) (Datum ohne Bedeutung).	16
Bild 14: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios SFBEMQ2600 entlang der Elbe bei Cuxhaven (Elbe – km 725), Brunsbüttel (Elbe – km 696),	

	Glückstadt (Elbe – km 675), Schulau (Elbe – km 641), Hamburg St. Pauli (Elbe – km 623N), Zollenspieker (Elbe – km 598) und Geesthacht (Elbe – km 585) (Datum ohne Bedeutung).	17
Bild 15:	SFREF und SBEM: Sturmflutscheitelwasserstand HW entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 755 (Elbmündung bei Bake Z) bis Elbe – km 585 (Geesthacht) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SBEMQ2600. Zusätzlich ist der Bemessungswasserstand 2085A (Länderarbeitsgruppe, 1988) eingetragen.	18
Bild 16:	SFREF und SBEM: Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstand THW entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 748 (Elbmündung) bis Elbe – km 585 (Geesthacht) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SBEMQ2600.	19
Bild 17:	SFREF: Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario SFREFQ2600 im Teilgebiet West zwischen Scharhorn und Glückstadt.	20
Bild 18:	SBEM: Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario SBEMQ2600 im Teilgebiet West zwischen Scharhorn und Glückstadt.	20
Bild 19:	SFREF: Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario SFREFQ2600 im Teilgebiet Hamburg zwischen Schulau und Bunthaus.	21
Bild 20:	SBEM: Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario SBEMQ2600 im Teilgebiet Hamburg zwischen Schulau und Bunthaus.	21
Bild 21:	SFREF: Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario SFREFQ2600 im Teilgebiet Ost zwischen Bunthaus und Geesthacht.	22
Bild 22:	SBEM: Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario SBEMQ2600 im Teilgebiet Ost zwischen Bunthaus und Geesthacht.	22
Bild 23:	SFREF und SBEM: Sturmflutscheitelwasserstand HW entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 755 (Elbmündung bei Bake Z) bis Elbe – km 585 (Geesthacht) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SBEMQ2600 sowie die genannten Abflüsse 2200 m ³ /s, 2700 m ³ /s, 3200 m ³ /s und 3700 m ³ /s.	23
Bild 24:	SFREF und SBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 725 (Cuxhaven) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SBEMQ2600 mit Abflussvarianten.	25
Bild 25:	SFREF und SBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 696 (Brunsbüttel) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SBEMQ2600 mit Abflussvarianten.	25
Bild 26:	SFREF und SBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 675 (Glückstadt) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SBEMQ2600 mit Abflussvarianten.	26
Bild 27:	SFREF und SBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 641 (Schulau) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SBEMQ2600 mit Abflussvarianten.	26

Bild 28:	SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 623N (Hamburg St. Pauli) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit Abflussvarianten.	27
Bild 29:	SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 598 (Zollenspieker) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit Abflussvarianten.	27
Bild 30:	SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 585 (Geesthacht) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit Abflussvarianten.	28
Bild 31:	Effektive Sohlrauheit (auch k_s nach Nikuradse genannt) im verwendeten HN – Modell des Elbeästuares.	33
Bild 32:	Topographie des numerischen Modells des Elbeästuares der BAW für Sturmflutuntersuchungen (PIZ02) für den Bereich stromauf von Geesthacht mit ausgewählten Pegelorten (Grundlage: Jahrespeilung 2010).	34
Bild 33:	Effektive Sohlrauheit (auch k_s nach Nikuradse genannt) im verwendeten HN – Modell des Elbeästuares für den Bereich stromauf von Geesthacht.	34
Bild 34:	Salzgehaltsverteilung zu Beginn des Simulationszeitraumes für die untersuchten Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit einem Salzgehalt von 30 PSU am Rand zur Nordsee.	35
Bild 35:	Salzgehaltsverteilung zu Beginn des Simulationszeitraumes für die untersuchten Sturmflutszenarien SFREFQ2600S28 und SFBEMQ2600S28 mit einem Salzgehalt von 28 PSU am Rand zur Nordsee.	36
Bild 36:	Salzgehaltsverteilung zu Beginn des Simulationszeitraumes für die untersuchten Sturmflutszenarien SFREFQ2600S25 und SFBEMQ2600S25 mit einem Salzgehalt von 25 PSU am Rand zur Nordsee.	36
Bild 37:	SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 725 (Cuxhaven) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600, SFREFQ2600S28, SFREFQ2600S25, SFBEMQ2600, SFBEMQ2600S28 und SFBEMQ2600S25.	37
Bild 38:	SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 641 (Schulau) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600, SFREFQ2600S28, SFREFQ2600S25, SFBEMQ2600, SFBEMQ2600S28 und SFBEMQ2600S25.	37
Bild 39:	SFREF und SFBEM: Sturmflutscheitelwasserstand (HW) entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 755 (Elbmündung bei Bake Z) bis Elbe – km 585 (Geesthacht) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 (rot), SFREFQ2600S28, SFREFQ2600S25, SFBEMQ2600, SFBEMQ2600S28 und SFBEMQ2600S25.	38
Bild 40:	Wind: Zeitliche Entwicklung der Windgeschwindigkeit bei Scharhörn (Messung und MKW) und Hamburg St. Pauli (Messung und MKW) während der Sturmflut 3. Januar 1976. Zusätzlich sind die für diese Orte um $\pm 5\%$ veränderten Windgeschwindigkeiten (MKW) eingezeichnet.	39

Bild 41:	SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 725 (Cuxhaven) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600, SFREFQ2600Wind+5%, SFREFQ2600Wind-5%, SFBEMQ2600, SFBEMQ2600Wind+5% und SFBEMQ2600Wind-5%.	40
Bild 42:	SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 641 (Schulau) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600, SFREFQ2600Wind+5%, SFREFQ2600Wind-5%, SFBEMQ2600, SFBEMQ2600Wind+5% und SFBEMQ2600Wind-5%.	40
Bild 43:	SFREF und SFBEM: Sturmflutscheitelwasserstand (HW) entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 755 (Elbmündung) bis Elbe – km 585 (Geesthacht) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600, SFREFQ2600Wind+5%, SFREFQ2600Wind-5%, SFBEMQ2600, SFBEMQ2600Wind+5% und SFBEMQ2600Wind-5%.	41
Bild 44:	SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 725 (Cuxhaven) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600, SFREFQ2600 mit Wind + 5 % und NoSeRand-1,2 %, SFREFQ2600 mit Wind – 5 % und NoSeRand+1,3 %, SFBEMQ2600, SFBEMQ2600 mit Wind + 5 % und NoSeRand-1,2 % und SFBEMQ2600 mit Wind – 5 % und NoSeRand + 1,3 %.	42
Bild 45:	SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 623N (Hamburg St. Pauli) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600, SFREFQ2600 mit Wind + 5 % und NoSeRand-1,2 %, SFREFQ2600 mit Wind – 5 % und NoSeRand+1,3 %, SFBEMQ2600, SFBEMQ2600 mit Wind + 5 % und NoSeRand-1,2 % und SFBEMQ2600 mit Wind – 5 % und NoSeRand+1,3 %.	43
Bild 46:	SFREF und SFBEM: Sturmflutscheitelwasserstand (HW) entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 755 (Elbmündung) bis Elbe – km 585 (Geesthacht) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 (rot), SFREFQ2600 mit Wind + 5 % und NoSeRand - 1,2 %, SFREFQ2600 mit Wind – 5 % und NoSeRand + 1,3 %, SFBEMQ2600, SFBEMQ2600 mit Wind + 5 % und NoSeRand - 1,2 % und SFBEMQ2600 mit Wind – 5 % und NoSeRand + 1,3 %.	44
Bild 47:	SF94: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Geesthacht (Elbe – km 583).	45
Bild 48:	SF94: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Artlenburg (Elbe – km 574).	46
Bild 49:	SF94: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Hohnstorf (Elbe- km 569).	46
Bild 50:	SF94: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Boizenburg (Elbe – km 559).	47
Bild 51:	SF94: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Bleckede (Elbe – km 551).	47

Bild 52:	SF94: Sturmflutscheitelwasserstand HW entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 755 (Elbmündung bei Bake Z) bis Elbe – km 550 (Bleckede) für das Sturmflutszenario SF94 sowie die genannten Abflüsse 2200 m ³ /s, 2600 m ³ /s, 2700 m ³ /s, 3200 m ³ /s und 3700 m ³ /s.	49
Bild 53:	SF94: Ausschnitt aus Bild 52: Scheitelwasserstand HW entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 590 (Drennhausen) bis Elbe – km 550 (Bleckede) für das Sturmflutszenario SF94 sowie die genannten Abflüsse 2200 m ³ /s, 2600 m ³ /s, 2700 m ³ /s, 3200 m ³ /s und 3700 m ³ /s.	49
Bild 54:	SF94: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 583 (Geesthacht) während der Sturmflut 28. Januar 1994 mit Abflussvarianten.	50
Bild 55:	SF94: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 574 (Artlenburg) während der Sturmflut 28. Januar 1994 mit Abflussflussvarianten.	51
Bild 56:	SF94: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 569 (Hohnstorf) während der Sturmflut 28. Januar 1994 mit Abflussvarianten.	51
Bild 57:	SF94: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 559 (Boizenburg) während der Sturmflut 28. Januar 1994 mit Abflussvarianten.	52
Bild 58:	SF94: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 551 (Bleckede) während der Sturmflut 28. Januar 1994 mit Abflussvarianten.	52
Bild 59:	SFREF und SFBEM: Sturmflutscheitelwasserstand HW entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 755 (Elbmündung bei Bake Z) bis Elbe – km 550 (Bleckede) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 sowie die genannten Abflüsse 2200 m ³ /s, 2700 m ³ /s, 3200 m ³ /s und 3700 m ³ /s.	53
Bild 60:	SFREF und SFBEM: Ausschnitt aus Bild 59, Scheitelwasserstand HW entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 590 (Drennhausen) bis Elbe – km 550 (Bleckede) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 sowie die genannten Abflüsse 2200 m ³ /s, 2700 m ³ /s, 3200 m ³ /s und 3700 m ³ /s.	54
Bild 61:	SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 583 (Geesthacht) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit Abflussvarianten.	55
Bild 62:	SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 574 (Artlenburg) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit Abflussvarianten.	55
Bild 63:	SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 569 (Hohnstorf) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit Abflussvarianten.	56
Bild 64:	SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 559 (Boizenburg) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit Abflussvarianten.	56

Bild 65:	SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 551 (Bleckede) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit Abflussvarianten.	57
Bild 66:	Sensitivitätsstudie Rauheitsverteilung: Effektive Sohlrauheit (auch k_s nach Nikuradse genannt) im verwendeten HN – Modell des Elbeästuares für den Bereich stromauf von Geesthacht. Diese Verteilung (sens12) senkt den Wasserstand stromauf von Geesthacht um ca. 10 cm.	58
Bild 67:	Sensitivitätsstudie Rauheitsverteilung: Effektive Sohlrauheit (auch k_s nach Nikuradse genannt) im verwendeten HN – Modell des Elbeästuares für den Bereich stromauf von Geesthacht. Diese Verteilung (sens09) hebt den Wasserstand stromauf von Geesthacht um ca. 10 cm.	59
Bild 68:	SF94: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 725 (Cuxhaven) während der Sturmflut 28. Januar 1994 mit veränderter Rauheitsverteilung stromauf von Geesthacht.	60
Bild 69:	SF94: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 623N (Hamburg St. Pauli) während der Sturmflut 28. Januar 1994 mit veränderter Rauheitsverteilung stromauf von Geesthacht.	60
Bild 70:	SF94: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 583 (Geesthacht) während der Sturmflut 28. Januar 1994 mit veränderter Rauheitsverteilung stromauf von Geesthacht.	61
Bild 71:	SF94: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 574 (Artlenburg) während der Sturmflut 28. Januar 1994 mit veränderter Rauheitsverteilung stromauf von Geesthacht.	61
Bild 72:	SF94: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 569 (Hohnstorf) während der Sturmflut 28. Januar 1994 mit veränderter Rauheitsverteilung stromauf von Geesthacht.	62
Bild 73:	SF94: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 559 (Boizenburg) während der Sturmflut 28. Januar 1994 mit veränderter Rauheitsverteilung stromauf von Geesthacht.	62
Bild 74:	SF94: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 551 (Bleckede) während der Sturmflut 28. Januar 1994 mit veränderter Rauheitsverteilung stromauf von Geesthacht.	63
Bild 75:	SFREFQ2600 und SFBEMQ2600: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 725 (Cuxhaven) während der Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit veränderter Rauheitsverteilung stromauf von Geesthacht.	64
Bild 76:	SFREFQ2600 und SFBEMQ2600: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 623N (Hamburg St. Pauli) während der Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit veränderter Rauheitsverteilung stromauf von Geesthacht.	64

Bild 77:	SFREFQ2600 und SFBEMQ2600: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 583 (Geesthacht) während der Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit veränderter Rauheitsverteilung stromauf von Geesthacht.	65
Bild 78:	SFREFQ2600 und SFBEMQ2600: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 574 (Artlenburg) während der Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit veränderter Rauheitsverteilung stromauf von Geesthacht.	65
Bild 79:	SFREFQ2600 und SFBEMQ2600: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 569 (Hohnstorf) während der Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit veränderter Rauheitsverteilung stromauf von Geesthacht.	66
Bild 80:	SFREFQ2600 und SFBEMQ2600: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 559 (Boizenburg) während der Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit veränderter Rauheitsverteilung stromauf von Geesthacht.	66
Bild 81:	SFREFQ2600 und SFBEMQ2600: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 551 (Bleckede) während der Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit veränderter Rauheitsverteilung stromauf von Geesthacht.	67
Bild 82:	SFREFQ2600, SFBEMQ2600 und SF94: Sturmflutscheitelwasserstand HW entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 755 (Elbmündung bei Bake Z) bis Elbe – km 550 (Bleckede) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600, SFBEMQ2600 und SF94 sowie die genannten Variationen der Rauheit stromauf von Geesthacht.	68
Bild 83:	SFREFQ2600, SFBEMQ2600 und SF94: Ausschnitt aus Bild 82: Scheitelwasserstand HW entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 590 (Drennhausen) bis Elbe – km 550 (Bleckede) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600, SFBEMQ2600 und SF94 sowie die genannten Variationen der Rauheit stromauf von Geesthacht.	68
Bild 84:	Teilgebiet West: Topographie des numerischen Modells des Elbeästuares der BAW für Sturmflutuntersuchungen (PIZ02, Grundlage: Jahrespeilung 2010).	69
Bild 85:	Teilgebiet Hafen: Topographie des numerischen Modells des Elbeästuares der BAW für Sturmflutuntersuchungen (PIZ02, Grundlage: Jahrespeilung 2010).	69
Bild 86:	Teilgebiet Ost: Topographie des numerischen Modells des Elbeästuares der BAW für Sturmflutuntersuchungen (PIZ02, Grundlage: Jahrespeilung 2010).	70

Tabellenverzeichnis	Seite
Tabelle 1: Abflüsse der Elbe bei Neu Darchau (Elbe – km 536) bezogen auf den Zeitraum 1926/2013 (DGJ, 2015, Länderarbeitsgruppe, 1988).	9
Tabelle 2: Sturmflutscheitelwasserstände HW für SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 an ausgewählten Orten entlang der Tideelbe sowie die Änderung der Sturmflutscheitelwasserstände dHW aufgrund einer Ab- bzw. Zunahme des Abflusses Q.	24
Tabelle 3: Sturmflutscheitelwasserstände HW für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600, die Sturmfluten 3. Januar 1976 (SF76) und 28. Januar 1994 (SF94) sowie die Bemessungssturmflut 2085A an sieben Orten entlang der Tideelbe.	29

Verzeichnis der Abkürzungen

Abkürzung	Vollständige Bezeichnung
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
DGJ	Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch
DGM	Digitales Geländemodell
DWD	Deutscher Wetterdienst
FF	Stationen mit Stundenwerten Wind des DWD
GF	Geschäftsfeld
HHQ	höchster bekannter Wert des Oberwasserzufluss (DGJ, 2015)
HHThw	höchster bekannter Wert des Tidehochwassers(DGJ, 2015)
HN - Modell	Hydrodynamisch – numerisches Modell
HPA	Hamburg Port Authority
HW	höchster Wasserstand in einem Zeitraum (DIN 4049-3)
IKSE - MKOL	Internationale Kommission zum Schutz der Elbe - Mezinardni komise pro ochranu Labe
LKN.SH	Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig – Holstein
LP	Längsprofil
LSBG	Landesbetrieb für Straßen, Brücken und Gewässer, Freie und Hansestadt Hamburg
MELUND-SH	Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein
MLUR–SH	Ministerium für ländliche Räume, Landesplanung, Landwirtschaft und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein
MKW	Massenkonsistentes Windfeld, Name des Windmodells des DWD
MThw	Mittleres Tidehochwasser
NHN	Normalhöhennull
NLWKN	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
NN	Normalnull
PIZ	Planerischer Ist – Zustand
Q	Abfluss, Oberwasserzufluss
SF	Sturmflut
SF76	Sturmflutszenario 3. Januar 1976
SF94	Sturmflutszenario 28. Januar 1994
SFREFQ2600	Sturmflutszenario Referenzwasserstand (Scheitelwasserstand Cuxhaven NHN + 5,78 m, Abfluss Neu Darchau Q = 2600 m ³ /s)
SFBEMQ2600	Sturmflutszenario Bemessungswasserstand (Scheitelwasserstand Cuxhaven NHN + 6,28 m, Abfluss Neu Darchau Q = 2600 m ³ /s)
THW	Eintrittszeit des HW

Thw	Tidehochwasser (DIN 4049-3)
Tnw	Tideniedrigwasser (DIN 4049-3)
UnTRIM	Unstructured TRIM, Name des HN-Modells
WSA	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Ziel des modernen Küstenschutzes in Zeiten des Klimawandels ist die dauerhafte Sicherung des bestehenden hohen Schutzniveaus im Küstenraum und die Erhaltung von gleichwertigen Lebensverhältnissen der Küstenbewohner. Gerade für den Bereich der Tideelbe, in der zukünftige Entwicklungen der Sturmflutwasserstände infolge des zu erwartenden Klimawandels besonders schwierig vorherzusagen sind, setzt dies ein abgestimmtes Handeln voraus. Vor diesem Hintergrund haben der Umweltsenator der Freien und Hansestadt Hamburg und die Umweltminister der Länder Niedersachsen und Schleswig-Holstein gemeinsam festgestellt, dass die länderübergreifende Zusammenarbeit im Küstenschutz zu intensivieren und entlang der Tideelbe ein gleichwertiges Schutzniveau anzustreben ist.

Dazu haben Hamburg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein 2017 eine Absichtserklärung zur länderübergreifenden Harmonisierung der Deichbemessung an der Tideelbe sowie eine Kooperationsvereinbarung über die Ermittlung von Wasserständen zur Bemessung von Deichen an der Tideelbe unterzeichnet. Im Rahmen dieser Kooperation ist vorgesehen, dass die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) entsprechende Modellierung durchführt zur Ermittlung der zur Bemessung heranzuziehenden Wasserstände in der Elbe von der Elbmündung bis zum Wehr Geesthacht. Die Kooperationspartner haben vereinbart, dass der Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN.SH) als Auftraggeber gegenüber der BAW auftritt.

Folgende Randwerte für die Modellierung der Sturmflutszenarien wurden vorgegeben:

- § Referenzwasserstand in Cuxhaven (SFREF): NHN + 5,78 m
- § Bemessungswasserstand in Cuxhaven(SFBEM): NHN + 6,28 m (NHN + 5,78 m zzgl. + 50 cm Meeresspiegelanstieg)
- § Verlauf der Windstaukurve, astronomischer Anteil und Fernwellenanteil in Cuxhaven
- § Windfelder der Sturmflut vom 3. Januar 1976 (Daten des DWD)
- § Oberwasserzufluss = 2600 m³/s am Wehr Geesthacht

In Abstimmung mit den Kooperationspartnern der Küstenländer wurde auf der Grundlage des von der BAW vorgelegten und mit den Kooperationspartnern einvernehmlich festgelegten Konzeptes und Angebots vom 06.06.2017 diese wasserbaulichen Systemanalyse durchgeführt. Mit Vertrag vom 03./04.07.2017 wurde der BAW vom LKN.SH der Auftrag zur Durchführung der Berechnungen erteilt.

2 Unterlagen und Daten

Zur Erstellung der Topographie des planerischen Ist – Zustandes (PIZ02) der Unter- und Außenelbe werden folgende Unterlagen verwendet:

- § Jahrespeilungen für das Jahr 2010
 - Wasserstraßen- und Schifffahrtsämter Lauenburg, Hamburg, Cuxhaven und Tönning
 - Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
- § Befliegungsdaten des Vorlandes von Geesthacht bis zur Elbmündung aus den Jahre 2010 und 2011.
 - Bundesanstalt für Gewässerkunde
- § Befliegungsdaten des Vorlandes von Bleckede bis Geesthacht aus dem Jahr 2003
 - Bundesanstalt für Gewässerkunde
- § Befliegungsdaten des Vorlandes im Bereich Borghorst – Geesthacht aus dem Jahr 2003
 - Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung der Freien und Hansestadt Hamburg
- § Landdaten für den bei Sturmflut überflutbaren Bereich des Hamburger Hafens aus dem Jahr 2010
 - Hamburg Port Authority

Zur Steuerung des HN – Modells während der untersuchten historischen Sturmflut werden die folgenden Daten verwendet:

- § Abfluss der Elbe bei Neu Darchau für Januar 1994 aus dem Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch (DGJ, 1997)
- § vom DWD GF Seeschifffahrt mit MKW (Schmidt, H. und Pätsch, J., 1992) modellierte Windfelder für den Untersuchungszeitraum 25. Januar bis 30. Januar 1994,

Zur Steuerung des HN – Modells während der untersuchten Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 werden die folgenden Daten verwendet:

- § vom DWD GF Seeschifffahrt mit MKW (Schmidt, H. und Pätsch, J., 1992) modellierte Windfelder für den Untersuchungszeitraum 1. Januar bis 4. Januar 1976,
- § Wasserstandsentwicklung am seeseitigen Rand aus den Vorgaben des Auftraggebers für den Pegel Cuxhaven (E-Mail Frerk Jensen, LKN.SH 23.9.2010),
- § vom Auftraggeber definierter konstanter Abfluss von 2600 m³/s.

Zusätzlich liegen folgende Daten vor

- § digitalisierte gemessene Wasserstandszeitreihen für Januar 1976 und Januar 1994 der Pegel Bleckede (nur 1994), Hohnstorf, Geesthacht Wehr, Altengamme (nur 1994), Over, Bunthaus, Hamburg St. Pauli, Harburg, Seemannshöft, Blankenese, Cranz, Schulau, Stadersand, Krautsand, Glückstadt (nur 1994), Brokdorf, Brunsbüttel, Osteriff, Otterndorf, Cuxhaven Steubenhöft, Büsum, Friedrichskoog, Bake W (Zehnerloch), Bake F (Mittelgrund), Neuwerk (nur 1994), Bake C (Scharhörn, nur 1994), Bake A (nur 1994), Bake Z (nur 1994) bereitgestellt vom WSA Lauenburg, WSA Hamburg, WSA Cuxhaven und HPA.

- § Messwerte der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung für Januar 1976 für die Stationen Cuxhaven und Hamburg St. Pauli aus dem Klimainformationssystem (Messnetz FF) des DWD.
- § Messwerte der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung für Januar 1976 für die Station Scharhorn bereitgestellt von Hamburg Port Authority HPA.

Es wird folgende Software eingesetzt:

- § hydrodynamisch – numerische Modellverfahren UnTRIM (BAW, 2004), ausführbares Programm: untrim2007_2016_07_29.i16.
- § Analyse der tideunabhängigen Kennwerte des Wasserstandes LZKWF (BAW, 2002), ausführbares Programm: Lzkwf_2012_12_06.xe.

3 Bearbeitungskonzept

Von den Ländern Hamburg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein ist am Ort des Pegels Cuxhaven in der Elbmündung ein Referenzwasserstand und ein Bemessungswasserstand festgelegt worden. Der Referenzwasserstand setzt sich aus dem mittleren Tidehochwasser MThw, der Springtidenerhöhung (wie am 10. September 2006), einer Fernwelle (modifizierte Fernwelle vom 18. Januar 1993) und dem modifizierten Windstau der Sturmflut vom 3. Januar 1976 zusammen und weist bei Cuxhaven einen maximalen Scheitelwert von 5,78 m NHN auf. Die diesem Referenzwasserstand entsprechende Ganglinie wird vom Auftraggeber für den Pegel Cuxhaven bereitgestellt (siehe Bild 1). Der Windverlauf soll der Windentwicklung während der Sturmflut vom 3. Januar 1976 entsprechen (siehe Bild 4). Als Abfluss der Elbe bei Neu Darchau sind 2600 m³/s vorgegeben (siehe zur Einordnung Tabelle 1). Das durch diese Randwerte charakterisierte Sturmflutszenario wird im Folgenden SFREFQ2600 genannt.

Der Bemessungswasserstand ist festgelegt als die Summe aus dem Referenzwasserstand zusätzlich eines Klimazuschlags in Höhe von 50 cm. Damit beträgt der Scheitelwert am Pegel Cuxhaven 6,28 m NHN; die Ganglinie ist insgesamt um 50 cm angehoben. Es gelten dieselben Windverhältnisse und Oberwassermengen wie für das Sturmflutszenario SFREFQ2600. Das um einen Klimazuschlag erhöhte Sturmflutszenario wird im Folgenden mit SFBEMQ2600 bezeichnet.

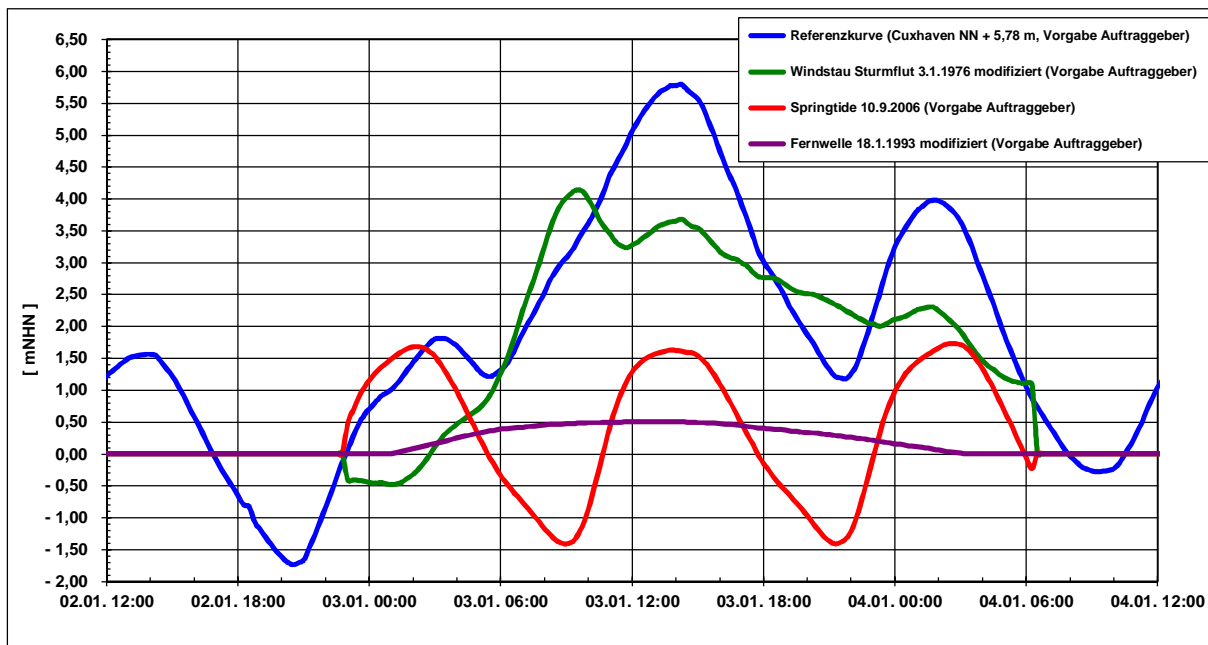


Bild 1: Ganglinie der Referenzflut für Cuxhaven (blau) für die Berechnung der Referenzwasserstände Elbe. Zusätzlich dargestellt sind die berücksichtigten Komponenten Springtide (rot), Windstau (grün) und Fernwelle (violett) (Datum ohne Bedeutung).

Die BAW hat den Auftrag, für die beiden beschriebenen Sturmflutszenarien den Wasserstandsverlauf entlang der Tideelbe zwischen Cuxhaven und Geesthacht zu bestimmen. Die Unter-

suchungen werden mit einem hydrodynamisch-numerischen Modell des Elbeästuares durchgeführt. Das Modellgebiet umfasst den von Sturmfluten beeinflussten Bereich der Elbe zwischen der Elbmündung bei Elbe - km 756 und der Mittelbe bei Bleckede (Elbe – km 550).

Der offene seeseitige Rand des verwendeten HN-Modells des Elbästuars liegt bei Nigehörn – Bake A – Blauortsand, also wesentlich weiter seewärts als der Pegel Cuxhaven, um die Strömungsparameter im Untersuchungsgebiet nicht durch die Randwertesteuerung zu beeinflussen. Die vorgegebenen Wasserstandsganglinien am Pegel Cuxhaven können nicht direkt zur Modellsteuerung verwendet werden. Deshalb werden zunächst die Wasserstände entlang des Steuerrandes so ermittelt, dass bei Cuxhaven die Sollwerte erreicht werden.

Die beiden Sturmflutszenarien für den Referenz- und Bemessungswasserstand (SFREFQ2600 und SFBEMQ2600) werden mit dem HN-Modell simuliert und die Sturmflutscheitelwasserstände im Untersuchungsgebiet zwischen der Elbmündung und dem Wehr Geesthacht analysiert.

Um den Einfluss des Abflusses auf die Sturmflutscheitelwasserstände der Sturmflutszenarien SF94, SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 entlang der Tideelbe abzuschätzen, werden die Sturmflutszenarien zusätzlich mit veränderten Abflüssen modelliert. Hierfür wird als Abfluss 2200 m³/s, 2700 m³/s, 3200 m³/s und 3700 m³/s gewählt.

Für den im Modellgebiet gelegenen Bereich stromauf des Wehres Geesthacht werden die im Untersuchungszeitraum von den Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 erreichte höchsten Wasserstände ebenfalls analysiert und im Rahmen einer Sensitivitätsstudie zur Rauigkeitsverteilung stromauf des Wehres Geesthachts vorgestellt.

Zusätzlich wird die Bedeutung der gewählten Wasserstandsrandwerte und Windfelder untersucht. Kleine Änderungen in den Wasserstandsrandwerten verbunden mit kleinen Änderungen im gewählten Windfeld können, obwohl sie in Cuxhaven den gleichen Wasserstandsverlauf ergeben, für Hamburg Unterschiede im Sturmflutscheitelwasserstand von mehreren cm ergeben.

4 Das mathematische Modell des Elbeästuares

4.1 Modelltopographie Planerischer Ist - Zustand PIZ02

Zur Erstellung der hochaufgelösten Modelltopographie liegen Informationen über den morphologischen Zustand 2010 (Jahrespeilung 2010) vor. Im planerischen Ist - Zustand (PIZ02, siehe auch Bild 2) werden außerdem alle baulichen Maßnahmen berücksichtigt, die bereits planfestgestellt sind. Die im April 2012 planfestgestellte, jedoch zum Termin der Gutachtenerstellung noch nicht umgesetzte Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe an 14,5 m tiefgehende Containerschiffe wird in der Topographie PIZ02 nicht berücksichtigt.

Die Modelltopographie PIZ02 (Grundlage Jahrespeilung 2010) enthält nicht die Rückdeichung Kreetsand. Die für diesen Bereich verwendete Topographie ist in Bild 85 dargestellt. Die Deichverstärkung Geesthacht ist ebenfalls nicht berücksichtigt. Der Polder Borghorster Elbwiesen (siehe Bild 86) wird in den hier vorliegenden Untersuchungen nicht gesteuert. Der Auftraggeber geht davon aus, dass die genannten Maßnahmen lediglich geringfügigen Einfluss auf die Höhe der Bemessungsturmflut haben.

Bild 3 zeigt das Längsprofil der Sohlage entlang des Elbefahrwassers für den planerischen Ist - Zustand (PIZ02) zwischen Elbe - km 750 in der Außenelbe und Elbe - km 550 bei Bleckede. Detailliertere Abbildungen der verwendeten Topographie für das Teilgebiet West (Bild 84), das Teilgebiet Hafen (Bild 85) und das Teilgebiet Ost (Bild 86) befinden sich in Abschnitt 8.7.

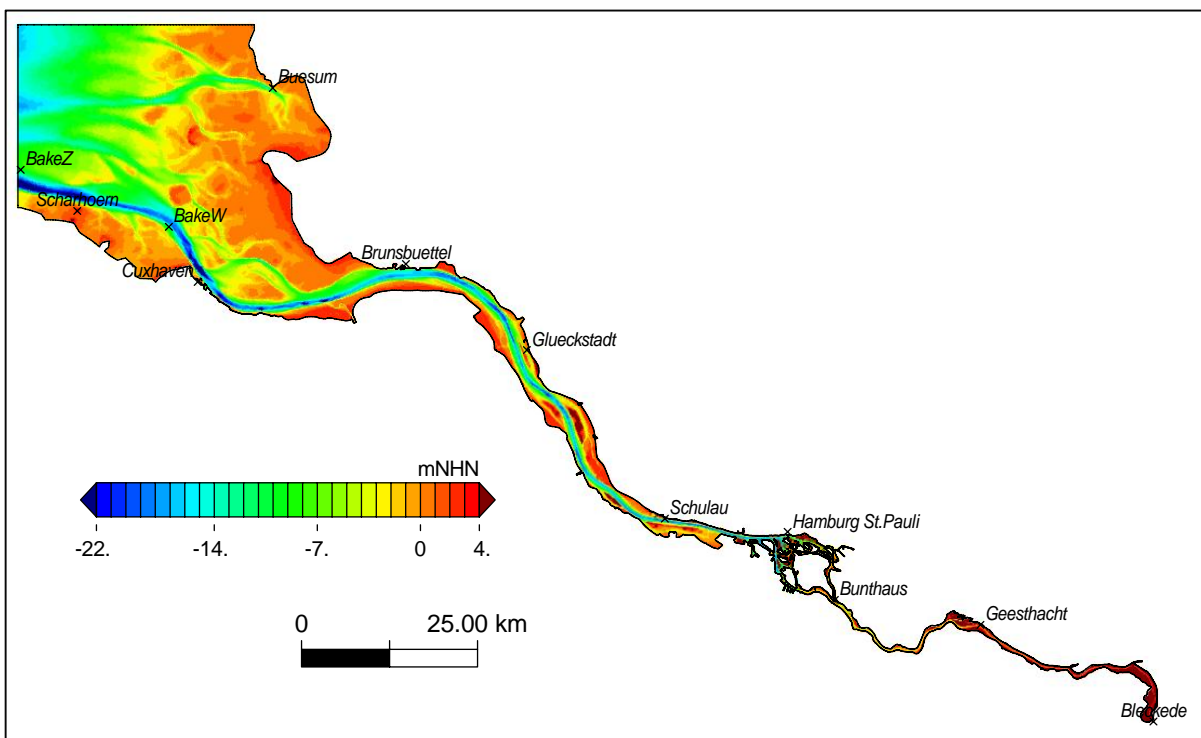


Bild 2: Topographie des numerischen Modells des Elbeästuares der BAW für Sturmflutuntersuchungen (PIZ02) mit ausgewählten Pegelorten (Grundlage: Jahrespeilung 2010).

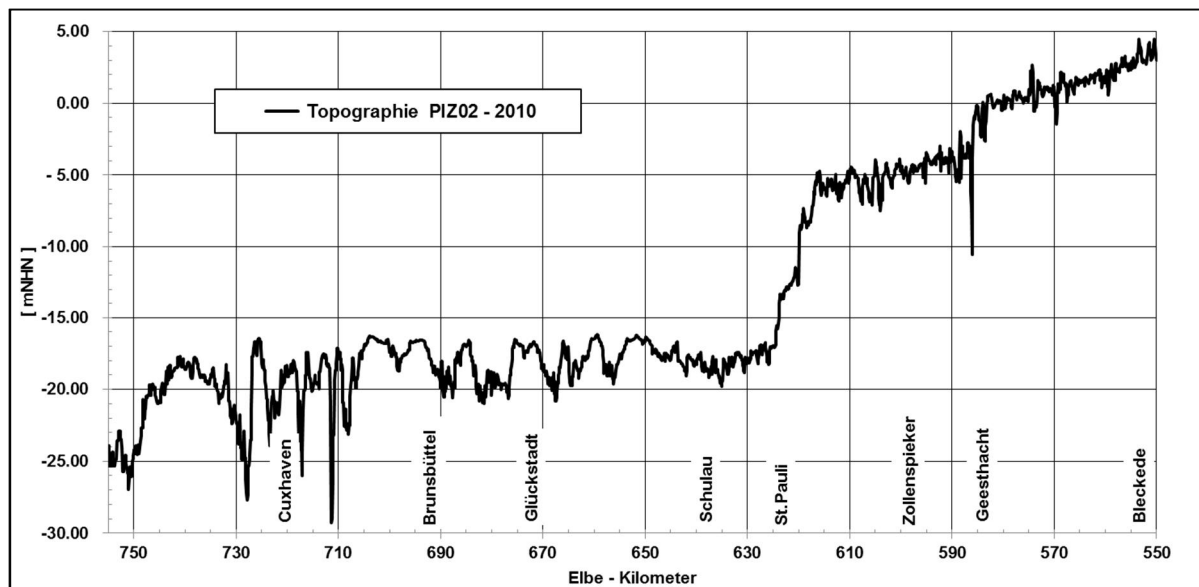


Bild 3: Längsprofil der auf NHN bezogenen Sohlage der Fahrrinnenachse in der Topographie des HN – Modells für den planerischen Ist – Zustand PIZ02 zwischen Elbe – km 755 und Elbe – km 550 (Bleckede).

4.2 Das numerische Verfahren UnTRIM

Die vom Auftraggeber entworfenen Sturmflutszenarien werden mit einem numerischen Modell des Elbeästuars unter Verwendung des dreidimensionalen hydrodynamisch - numerischen (HN -) Modellverfahrens UnTRIM (siehe Casulli, V. und Walters, R. A., 2000) untersucht. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens findet sich im Mathematical Model UnTRIM - Validation Document (BAW, 2004). UnTRIM ist ein Finite Differenzen/ Finite Volumen Verfahren, das die Flachwassergleichungen auf einem unstrukturierten orthogonalen Gitter löst. Grundlage des Verfahrens UnTRIM sind Differentialgleichungen, die eine mathematische Formulierung der physikalischen Erhaltungssätze für das Wasservolumen und den Impuls der Strömung darstellen.

Mit diesem Berechnungsverfahren können flächendeckend für jeden aktiven Gitterpunkt und Zeitschritt u. a. folgende physikalische Größen berechnet und ausgegeben werden:

- § Wasserspiegelauslenkung (bezüglich NHN) und
- § Strömungsgeschwindigkeit (tiefenaufgelöst oder tiefengemittelt).

Bei der Berechnung der aufgezählten physikalischen Größen berücksichtigt das mathematische Modell des Elbeästuars folgende, die Tidedynamik beeinflussende Prozesse:

- § Oberwasserzufluss,
- § Trockenfallen und Überfluten von Wattflächen,
- § Sohlreibung,
- § Impulseintrag durch Wind,
- § turbulente Diffusion des Strömungsimpulses,
- § Corioliskraft sowie den

§ advektiven Impulstransport.

Die räumliche und zeitliche Variabilität des lokalen Windfeldes erzeugt einen zusätzlichen räumlich und zeitlich variablen Impulseintrag aus der Atmosphäre, der Strömung und Wasserstand von Flüssen und Ästuaren kleinräumig beeinflusst. Dieser Effekt ist bei Extremereignissen wie Sturmfluten nicht zu vernachlässigen und muss deshalb im Rahmen dieser Untersuchungen im HN - Modell berücksichtigt werden. Der Impulseintrag aus der Atmosphäre wird parametrisiert und durch die Windschubspannung τ_{Wind} beschrieben:

$$\tau_{\text{Wind}} = \rho_{\text{Luft}} C_D V_{10,\text{Wind}} |v_{10,\text{Wind}}|.$$

Hierbei bezeichnet ρ_{Luft} die Dichte der Luft und $v_{10,\text{Wind}}$ die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über Grund. Für die vorliegenden Untersuchungen wird der Impulsaustauschkoeffizient C_D mit den von Smith und Banke (1975) vorgeschlagenen Koeffizienten berechnet:

$$C_D = (0.63 + 0.066 |v_{10,\text{Wind}}|) 10^{-3}.$$

4.3 Modellgebiet

Das Modellgebiet des verwendeten HN - Modells des Elbeästuares umfasst folgende Gebiete:

- § Außenelbe bis Elbe - km 756,
- § Unterelbe und
- § Mittelelbe bis Bleckede (Elbe – km 550).

Bei der Festlegung der Grenzen (Berandung) des Modellgebietes werden folgende Kriterien beachtet:

- § da bei hohem Abfluss ($Q > 1200 \text{ m}^3/\text{s}$, WSA Lauenburg, 2017) oder Sturmflut das Wehr Geesthacht gelegt wird, reicht das Modellgebiet bis Bleckede.
- § da bei Sturmflut die Nebenflüsse der Elbe durch Sperrwerke von der Elbe getrennt sind, werden diese im Modell nicht berücksichtigt.

Ausgehend von den vorstehend ausgeführten Kriterien wird das in Bild 2 dargestellte Modellgebiet gewählt. Der seeseitige Rand des Modellgebietes wird durch die gedachte Linie von Cuxhaven - Sahlenburg über Neuwerk, Scharhörn, Bake A, Bake Z bis Blauortsand und dann nach Osten zur Schleswig - Holsteinischen Küste gebildet. Landseitig endet das Modell bei Bleckede. Das Gebiet des Elbeästuares ist bis zur Deichlinie nachgebildet.

4.4 Gitternetz

Das dem HN - Modell der Elbe zugrunde liegende unstrukturierte orthogonale Gitternetz ist im vorliegenden Fall aus dreieckigen und viereckigen Gitterelementen aufgebaut und überdeckt das Modellgebiet vollständig. Gitternetz und räumliche Diskretisierung werden wie folgt näher beschrieben:

Anzahl der Knoten: 87523

Anzahl der Kanten: 224196

Anzahl der Polygone: 136646

Kantenlänge: 5 m bis 1070 m

Elementflächen: 35 m² bis 0,97 km²

4.5 Modellsteuerung

Für die Steuerung des mathematischen Modells wird am offenen seeseitigen Rand der zeitliche Verlauf des Wasserstandes für jedes auf dem offenen Rand liegende Polygon vorgegeben.

Für das auf der Grundlage der historischen Sturmflut vom 28. Januar 1994 beruhenden Sturmflutszenario SF94 wird der Wasserstandsverlauf aus Modellergebnissen des großräumigen HN – Modells der Deutschen Bucht (Plüß, A., 2003) vorgegeben.

Für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 wird der Wasserstandsverlauf auf dem seeseitigen Modellrand unter Berücksichtigung von Übertragungsfunktionen so erzeugt, dass die Vorgaben des Auftraggebers für Cuxhaven erreicht werden.

MNQ (mittlerer niedrigster Abfluss)	276 m ³ /s
MQ (mittlerer Abfluss)	714 m ³ /s
MHQ (mittlerer höchster Abfluss)	1970 m ³ /s
HQ (höchster Abfluss 1926/2013, 11. Juni 2013)	4080 m ³ /s
Elbehochwasser 2002: 22. August 2002	3425 m ³ /s
Elbehochwasser 2006: 10. April 2006	3600 m ³ /s
Elbehochwasser 2011: 22. Januar 2011	3600 m ³ /s
Elbehochwasser 2013: 11. Juni 2013	4080 m ³ /s
Abfluss während der Sturmflut 3. Januar 1976	500 m ³ /s
Abfluss während der Sturmflut 28. Januar 1994	1350 m ³ /s
Abfluss der Bemessungssturmflut 2085A	2200 m ³ /s
Abfluss der Sturmflutszenarien SFREFQ2600, SFBEMQ2600	2600 m ³ /s

Tabelle 1: Abflüsse der Elbe bei Neu Darchau (Elbe – km 536) bezogen auf den Zeitraum 1926/2013 (DGJ, 2015, Länderarbeitsgruppe, 1988).

Die verwendete Reibungsverteilung (effektive Sohlrauheit) ist in Bild 31 dargestellt. Bild 34 zeigt die Salzgehaltsverteilung zu Beginn des Simulationszeitraums für die drei untersuchten Sturmflutszenarien SF94, SFREFQ2600 und SFBEMQ2600.

Am landseitigen offenen Modellrand bei Bleckede wird für das Sturmflutszenario SF94 die am Pegel Neu Darchau im Januar 1994 gemessenen täglichen Abflüsse (siehe hierzu DGJ, 1997) mit einem Zeitversatz von + 7 Stunden (pers. Mitteilung WSA Lauenburg) vorgegeben. Für die hier untersuchten Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 ist der Abfluss konstant mit $Q = 2600 \text{ m}^3/\text{s}$ vom Auftraggeber festgelegt worden. Eine Einordnung des gewählten Abflusses gibt Tabelle 1.

Das Wehr Geesthacht ist bei Sturmflut gelegt. Die Sturmflutsperrwerke an den Nebenflüssen der Elbe werden für die Untersuchungszeiträume als geschlossen vorausgesetzt.

Zur Berechnung des Impulseintrages aus der Atmosphäre während der Sturmflutszenarien wird die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe aus modellierten hoch aufgelösten lokalen Windfeldern über dem gesamten Modellgebiet vorgegeben. Im Abstand von zwei Stunden liegen für die Zeiträume 1. Januar 1976 bis 4. Januar 1976 (SFREFQ2600 und SFBEMQ2600) und 25. Januar 1994 bis 29. Januar 1994 (SF94) vom DWD mit MKW (H. Schmidt und J. Pätsch, 1992) modellierte Windfelder mit einer räumlichen Auflösung von 450 m x 450 m vor. Bild 4 zeigt die zeitliche Entwicklung der Windgeschwindigkeit und Windrichtung während der Sturmflut 3. Januar 1976 modelliert mit MKW bei Scharhörn, Cuxhaven und Hamburg St. Pauli. Diese Windentwicklung wird für Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 vorgegeben.

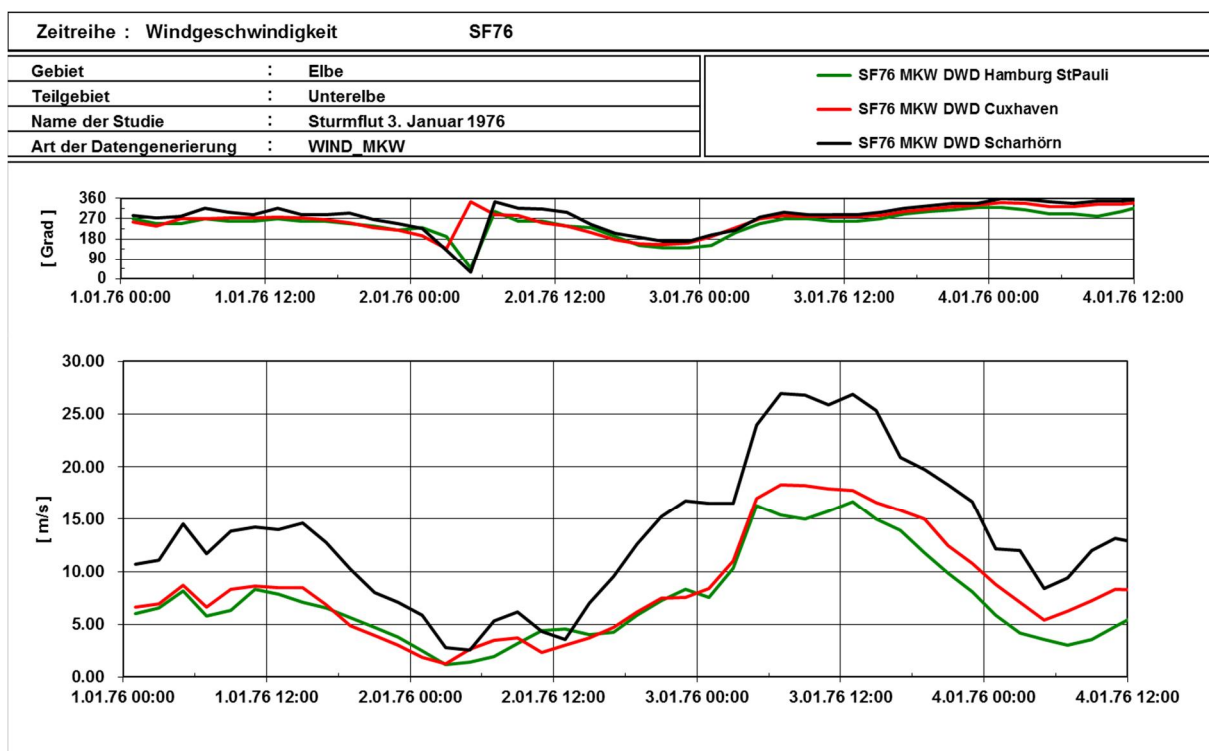


Bild 4: Zeitliche Entwicklung der Windgeschwindigkeit (unten) und der Windrichtung (oben) über der Elbe bei Scharhörn (schwarz), Cuxhaven (rot) und Hamburg St. Pauli (grün) während der Sturmflut 3. Januar 1976 verwendet für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 modelliert vom DWD mit MKW.

4.6 Sturmflutszenario 28. Januar 1994 – Vergleich Messung und Modell- ergebnisse

Bild 5 bis Bild 11 zeigen einen Vergleich zwischen den mit dem HN – Modell der Elbe berechneten (schwarz) und den gemessenen Wasserstandszeitreihen (rot) für den Zeitraum 27. Januar 1994 00:00 Uhr bis 29. Januar 1994 12:00 Uhr (Sturmflutszenario SF94) an den Pegeln Bake A (auf dem Modellrand), Cuxhaven Steubenhöft, Büsum, Brunsbüttel, Glückstadt, Hamburg St. Pauli und Bunthaus. Die Lage dieser Pegel ist in Bild 2 markiert. Man erkennt eine gute Übereinstimmung der gemessenen mit den modellierten Wasserstandszeitreihen. Die modellierten Sturmflutscheitelwasserstände weichen an den gezeigten Pegeln um ± 15 cm von den gemessenen Scheitelwasserständen ab.

Die vergleichende Gegenüberstellung des gemessenen (rot) und des mit dem HN – Modell des Elbeästuares numerisch berechneten (schwarz) Wasserstandsverlaufs auf Bild 5 bis Bild 11 zeigt, dass das Systemverhalten im Tidezyklus sowohl hinsichtlich der Höhen- als auch der Phasenlage durch das Modell nachgebildet wird.

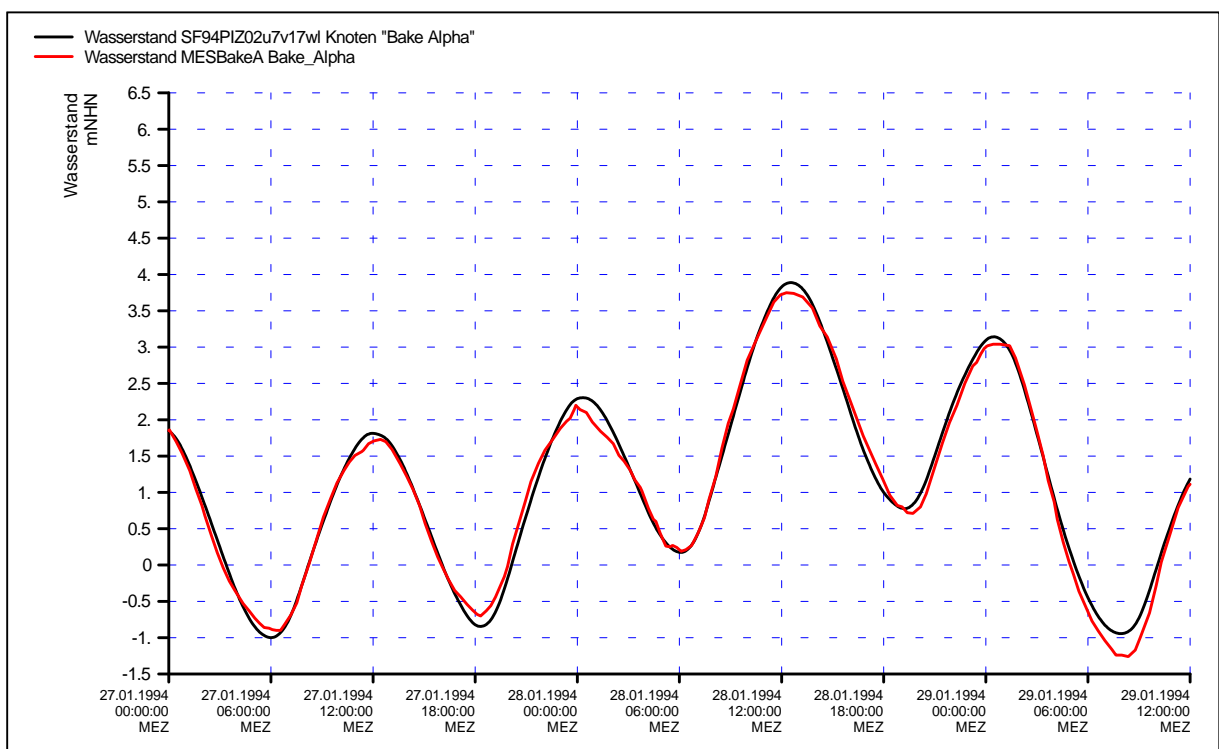


Bild 5: SF94: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Bake A. Die Messung ist rot und die Modellrechnung schwarz gekennzeichnet.

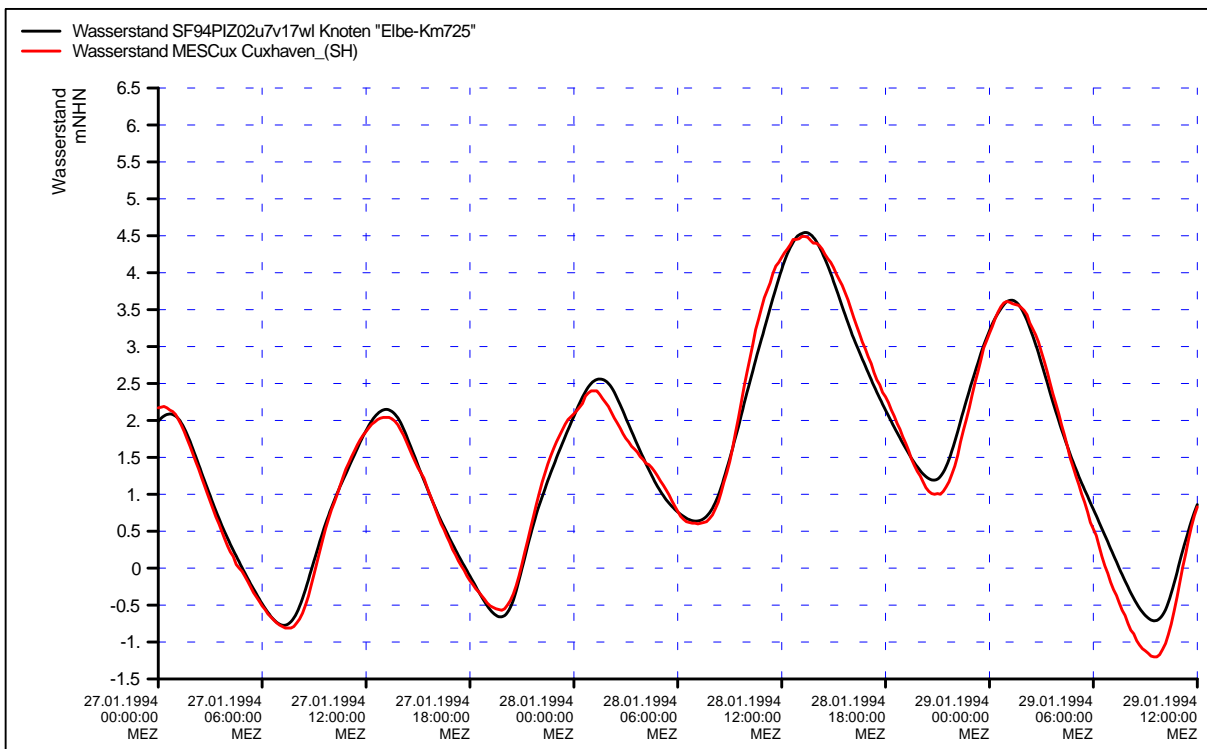


Bild 6: SF94: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Cuxhaven. Die Messung ist rot und die Modellrechnung schwarz gekennzeichnet.

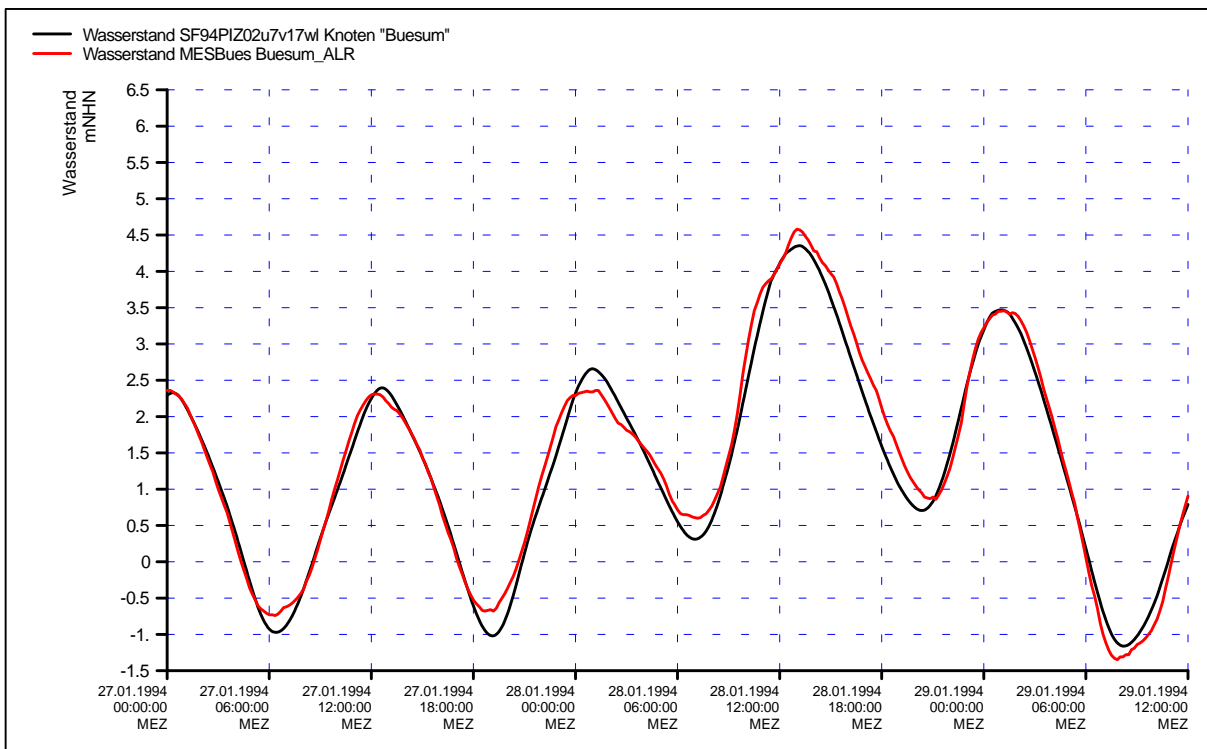


Bild 7: SF94: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Buesum. Die Messung ist rot und die Modellrechnung schwarz gekennzeichnet.

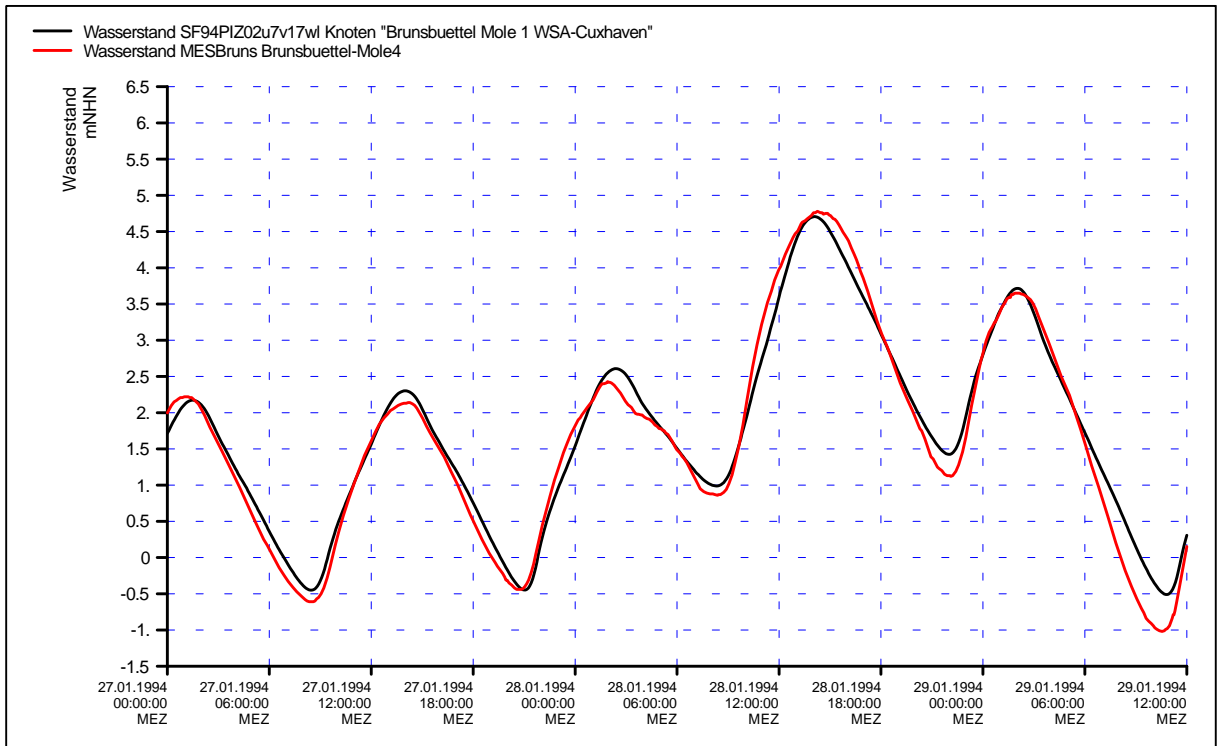


Bild 8: SF94: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Brunsbüttel. Die Messung ist rot und die Modellrechnung schwarz gekennzeichnet.

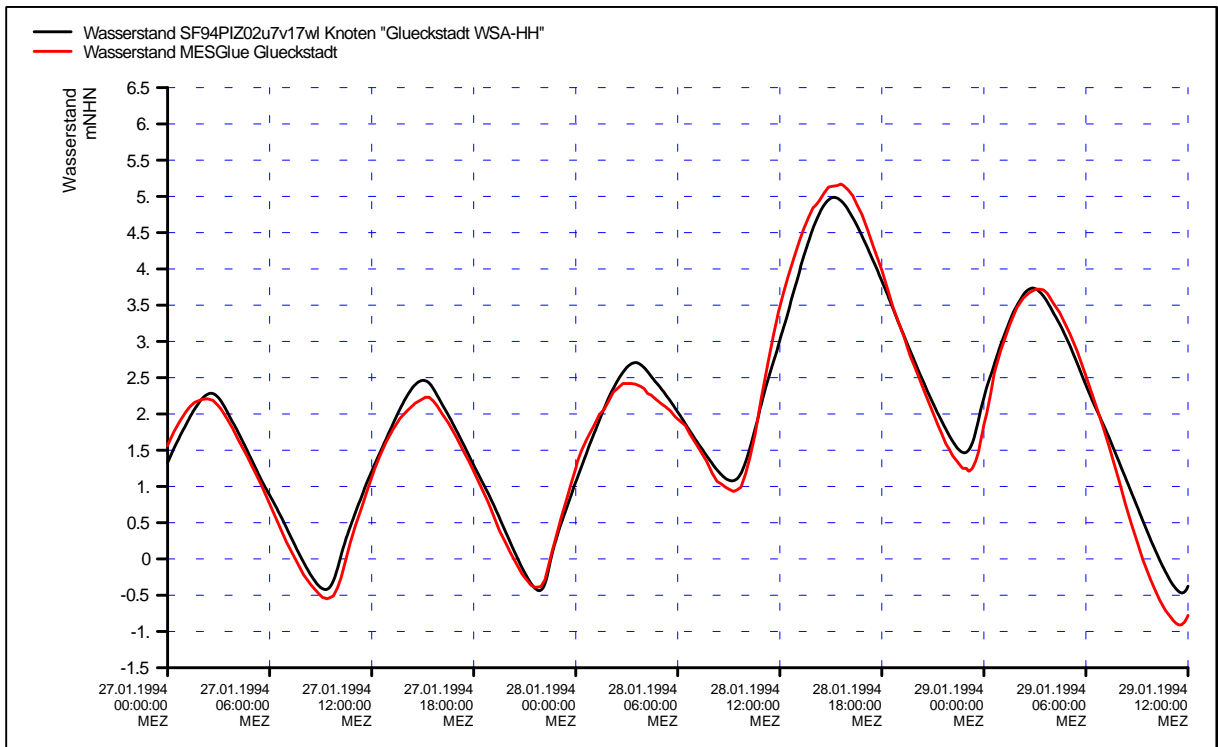


Bild 9: SF94: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Glückstadt. Die Messung ist rot und die Modellrechnung schwarz gekennzeichnet.

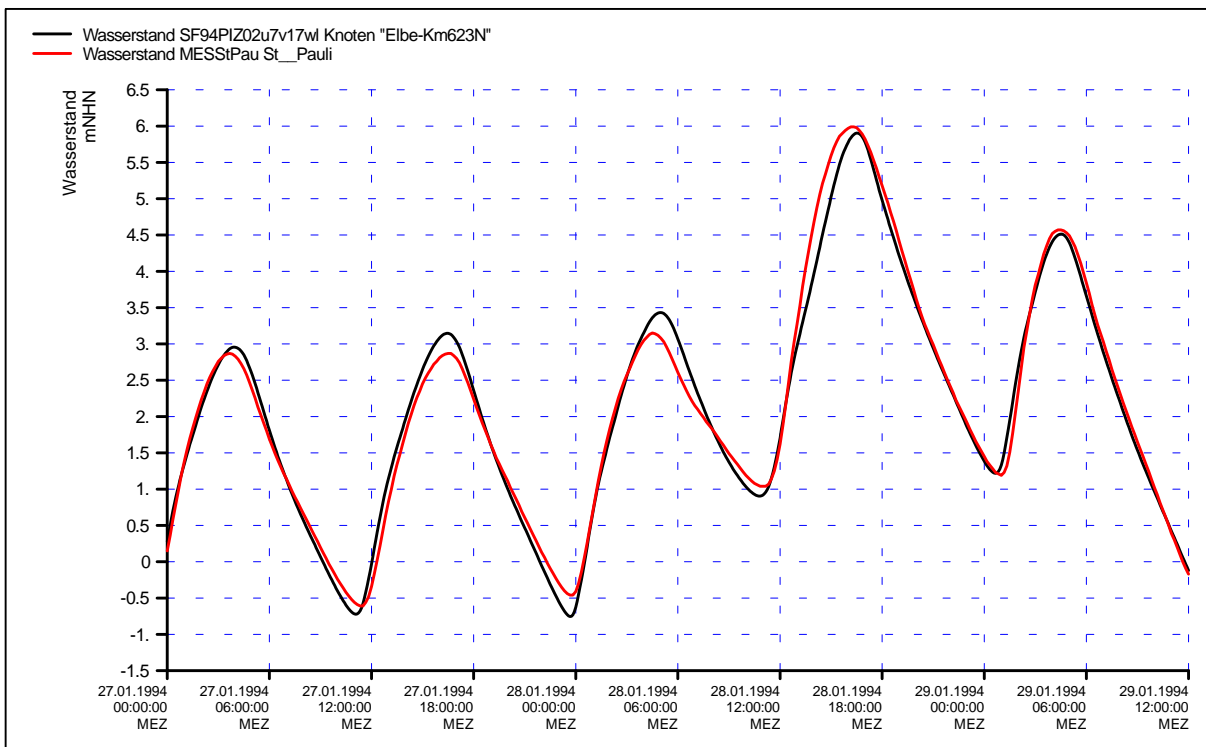


Bild 10: SF94: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Hamburg St. Pauli. Die Messung ist rot und die Modellrechnung schwarz gekennzeichnet.

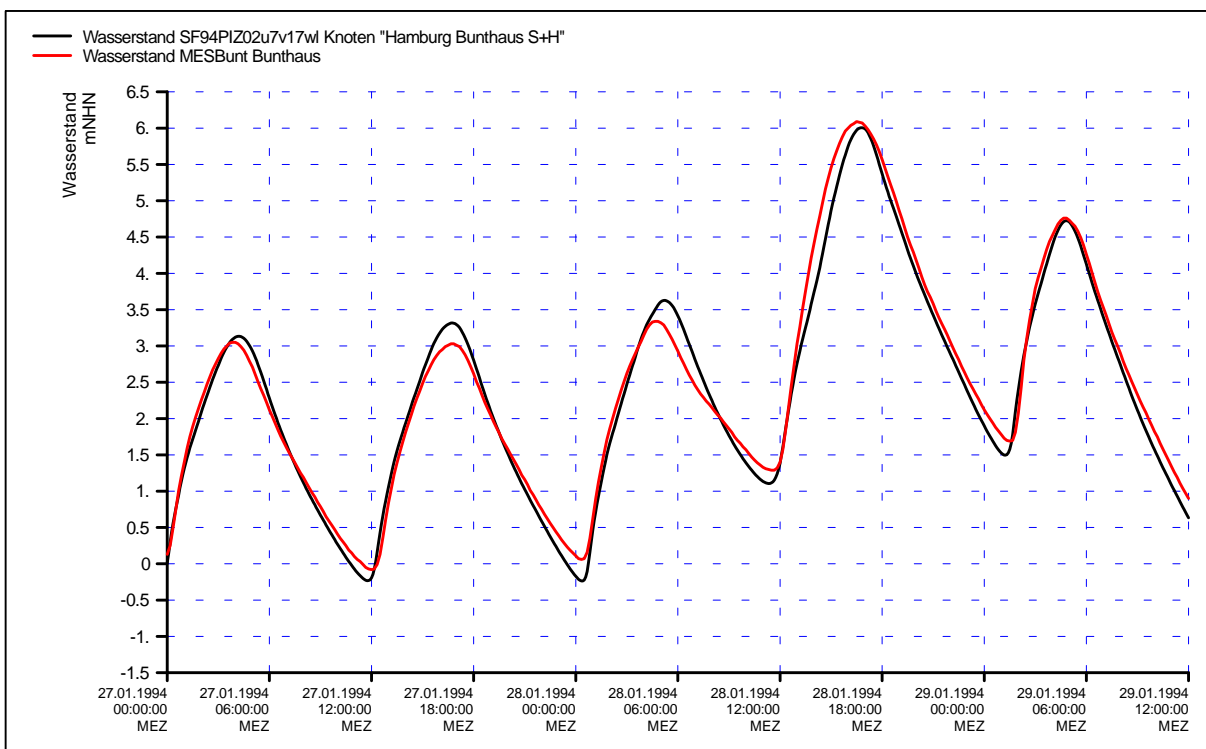


Bild 11: SF94: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Bunthaus. Die Messung ist rot und die Modellrechnung schwarz gekennzeichnet.

5 Wasserstände während der Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600

Aus den Vorgaben des Auftraggebers ergeben sich die in Bild 12 dargestellten Wasserstandszeitreihen in Cuxhaven. Zum Vergleich ist der vom Auftraggeber vorgegebene Wasserstandsverlauf (blau) sowie der während der Sturmflut 3. Januar 1976 in Cuxhaven gemessene Wasserstandsverlauf (grün) eingetragen. Man erkennt, dass die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 (rot) und SFBEMQ2600 (schwarz) in ihrem Verlauf der Sturmflut vom 3. Januar 1976 ähneln. Die Drehung der Windrichtung von Süd (180 Grad) auf West (270 Grad) und die gleichzeitige Zunahme der Windgeschwindigkeit auf mehr als 25 m/s (Bft 9) am Vormittag des 3. Januar 1976 (Bild 4) behinderte das Abfließen des Wassers aus der Elbe vor der Sturmflut. Das Tideniedrigwasser (Tnw) liegt deutlich über dem MTnw = NHN - 1,42 m (DGJ, 2015). Die anschließende Sturmflut erreicht entlang der Elbe die höchsten bekannten Wasserstände HHThw (DGJ, 2015). Auch für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 wird von einem „Ausbleiben der Ebbe vor der Sturmflut“ ausgegangen.

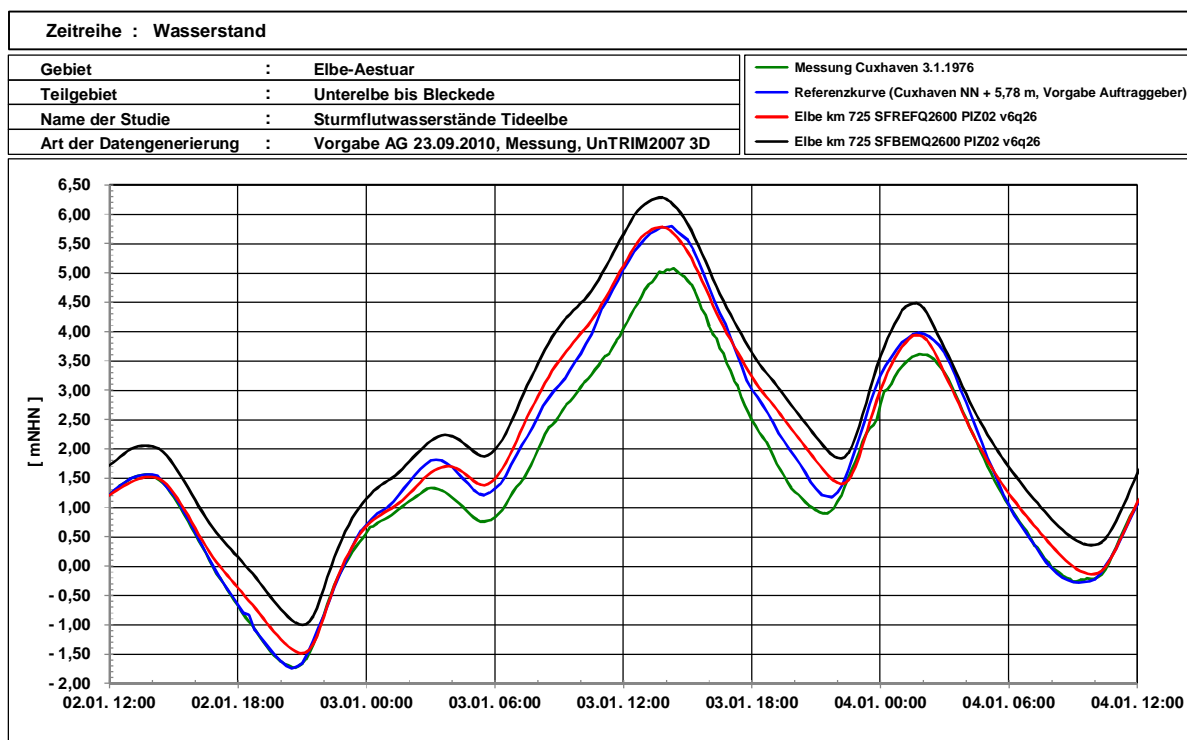


Bild 12: Wasserstandsverlauf Cuxhaven (Elbe – km 725) für die betrachteten Sturmflutszenarien. Die Vorgabe des Auftraggebers für das Sturmflutszenario SFREFQ2600 (Referenzkurve) ist blau gekennzeichnet. Für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 (rot) und SFBEMQ2600 (schwarz) ist das Modellergebnis des Elbemodells in Cuxhaven dargestellt. Der gemessene Wasserstandsverlauf in Cuxhaven während der Sturmflut 3. Januar 1976 ist grün markiert.

5.1 Wasserstandszeitreihen SFREFQ2600 und SFBEMQ2600

Als Ergebnis der numerischen Modellierung stehen für jede durchgeführte Simulation an jedem Gitterpunkt für jeden Ausgabetermin u. a. der Wasserstand und die Strömungsgeschwindigkeit zur Verfügung. Beispielhaft zeigt Bild 13 die Wasserstandsentwicklung des Sturmflutszenarios SFREFQ2600 entlang der Elbe an den Orten Cuxhaven (Elbe – km 725), Brunsbüttel (Elbe – km 696), Glückstadt (Elbe – km 675), Schulau (Elbe – km 641), Hamburg St. Pauli (Elbe – km 623N), Zollenspieker (Elbe – km 598) und Geesthacht (Elbe – km 585).

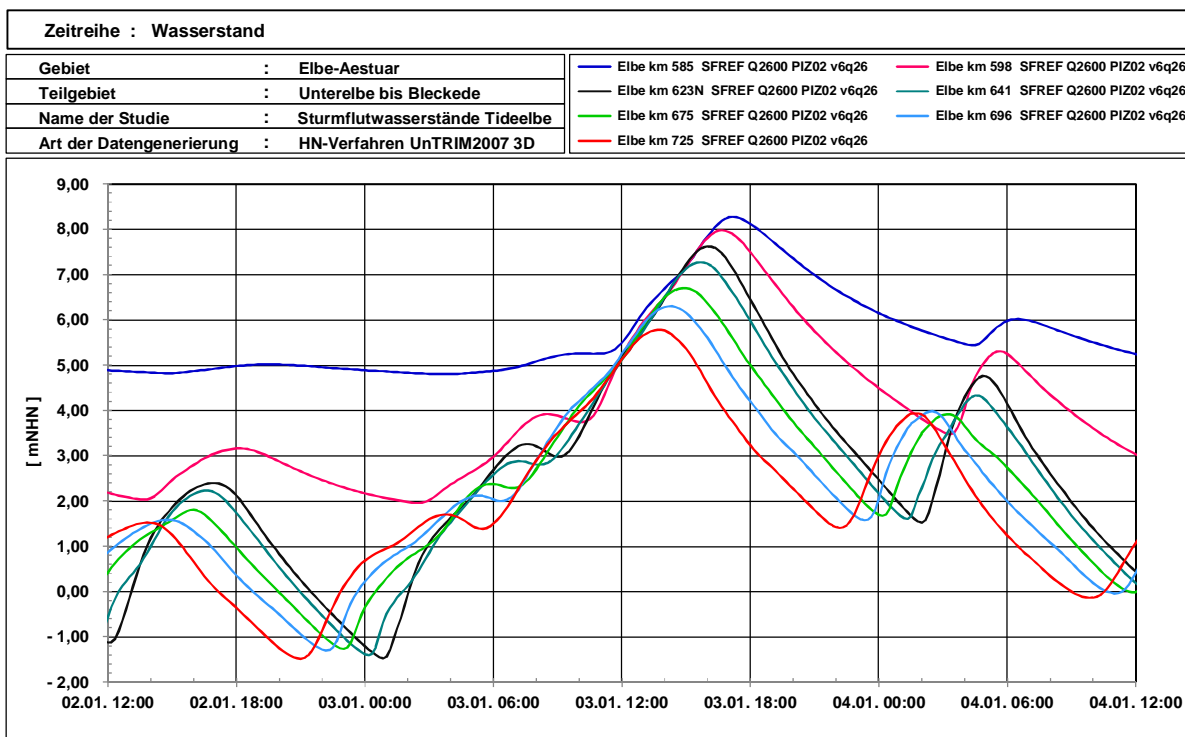


Bild 13: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios SFREFQ2600 entlang der Elbe bei Cuxhaven (Elbe – km 725, rot), Brunsbüttel (Elbe – km 696, cyan), Glückstadt (Elbe – km 675, grün), Schulau (Elbe – km 641, dunkelgrün), Hamburg St. Pauli (Elbe – km 623N, schwarz), Zollenspieker (Elbe – km 598, magenta) und Geesthacht (Elbe – km 585, blau) (Datum ohne Bedeutung).

Am 3. Januar wird an den dargestellten Orten entlang des Elbeästuares zeitweise (z. B. gegen 12:00 Uhr) der gleiche Wasserstand erreicht. Das deutet darauf hin, dass entlang des Elbeästuares zu dieser Zeit kein Wasserstandsgradient auftritt. Es herrschen relative geringe Flutstromgeschwindigkeiten. Dieses Verhalten wird auch während der Sturmflut vom 3. Januar 1976 beobachtet.

Für das Sturmflutszenario SFBEMQ2600 wird ein Meeresspiegelanstieg in der Nordsee von 50 cm angenommen, so dass in Cuxhaven ein Sturmflutscheitelwasserstand von NHN + 6,28 m (siehe Bild 14) erreicht wird. Um diesen Meeresspiegelanstieg im HN – Modell der Elbe zu realisieren, werden die Wasserstandsrandwerte des Sturmflutszenarios SFREFQ2600 am

offenen Rand zur Nordsee um 50 cm angehoben (siehe auch Bild 12). Bild 14 zeigt die Wasserstandsentwicklung entlang der Elbe für das Sturmflutszenario SFBEMQ2600 an den Orten Cuxhaven (Elbe – km 725), Brunsbüttel (Elbe – km 696), Glückstadt (Elbe – km 675), Schulau (Elbe – km 641), Hamburg St. Pauli (Elbe – km 623N), Zollenspieker (Elbe – km 598) und Geesthacht (Elbe – km 585).

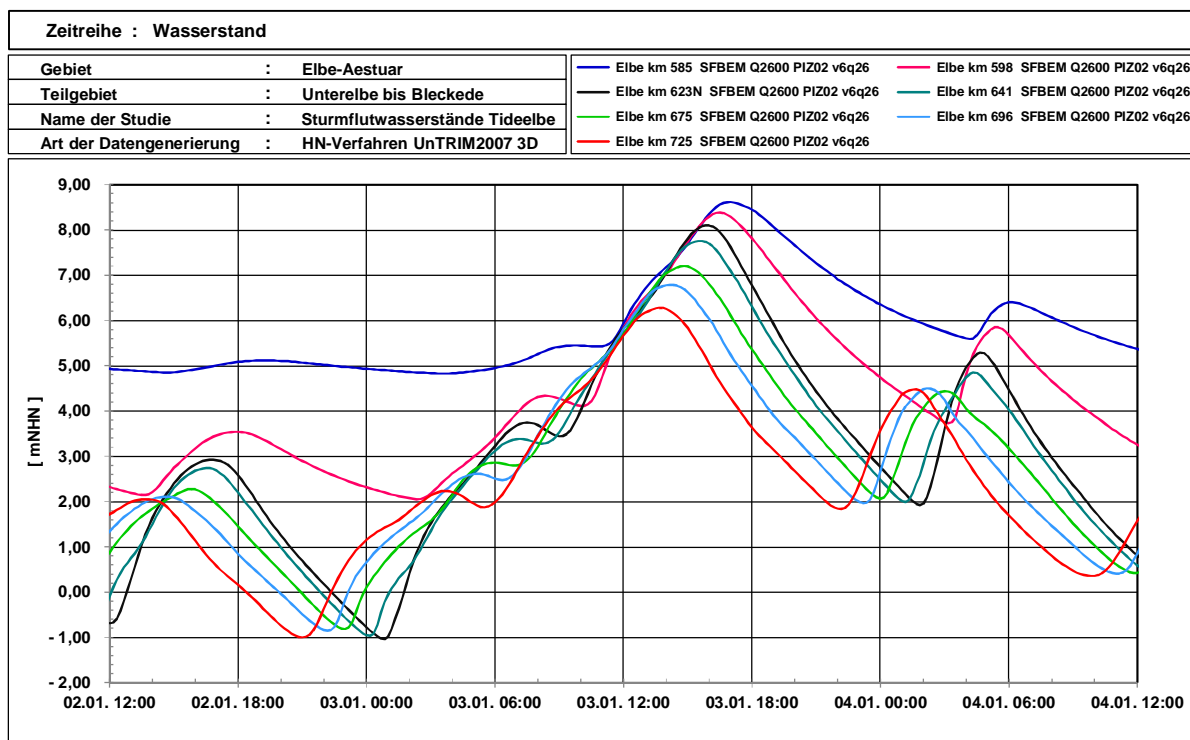


Bild 14: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios SFBEMQ2600 entlang der Elbe bei Cuxhaven (Elbe – km 725; rot), Brunsbüttel (Elbe – km 696, cyan), Glückstadt (Elbe – km 675, grün), Schulau (Elbe – km 641, dunkelgrün), Hamburg St. Pauli (Elbe – km 623N, schwarz), Zollenspieker (Elbe – km 598, magenta) und Geesthacht (Elbe – km 585, blau) (Datum ohne Bedeutung).

Bei Sturmflut wird der Wasserstand im Elbeästuar durch folgende Randwerte bestimmt:

- § dem Wasserstandsverlauf am Rand zur Nordsee,
- § dem Wind über der Nordsee und dem Elbeästuar und
- § dem in das Elbeästuar aus der Mittel-elbe fließenden Oberwasserzufluss.

Die Bedeutung der verwendeten Randwerte (Wind, Wasserstand, Abfluss) und Anfangswerte (Salzgehalt) für die Sturmflutscheitelwasserstände entlang der Tideelbe wird im Rahmen von Sensitivitätsuntersuchungen in den Abschnitten 5.4, 8.2 und 8.3 betrachtet. Im Ästuar selbst verändern Prozesse wie Reibung an der Gewässersohle oder Impulseintrag aus der Atmosphäre den Sturmflutwasserstand. Durch eine größere Wassertiefe, bedingt durch z. B. einen Meeresspiegelanstieg, sind folgende Veränderungen bei Sturmflut zu erwarten:

- § verringerter Effekt der Sohlreibung und somit eine Erhöhung der Hochwasserstände;
- § verringerter Effekt des lokalen Windes und somit ein Absenken der Hochwasserstände.

Ein HN – Modell, wie das hier eingesetzte Verfahren UnTRIM (BAW, 2004) ist in der Lage, diese Prozesse und ihre nichtlineare Wechselwirkung zu beschreiben.

5.2 Wasserstandskenngrößen

Im Rahmen einer sich an die Modellrechnung anschließenden Analyse der Berechnungsergebnisse werden aus den Zeitreihen der Wasserstände für jedes Sturmflutszenario (Simulationslauf) im gesamten Modellgebiet folgende tideunabhängige Kennwerte des Wasserstandes (BAW, 2002) bestimmt:

§ Sturmflutscheitelwasserstand HW (höchster aufgetretener Wasserstand) im Analysezeitraum (hier 3. Januar 00:00 Uhr bis 4. Januar 00:00 Uhr, Datum ohne Bedeutung),

§ Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes THW bezogen auf Elbe - km 748.

Bild 15 zeigt den Sturmflutscheitelwasserstand HW für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 auf einem Profil entlang des Elbefahrwassers zwischen Elbe – km 755 (Bake Z) und Elbe – km 585 (Geesthacht). Zur Einordnung der Sturmflutscheitelwasserstände der Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 ist zusätzlich der Bemessungswasserstand 2085A (Länderarbeitsgruppe, 1988) aufgetragen.

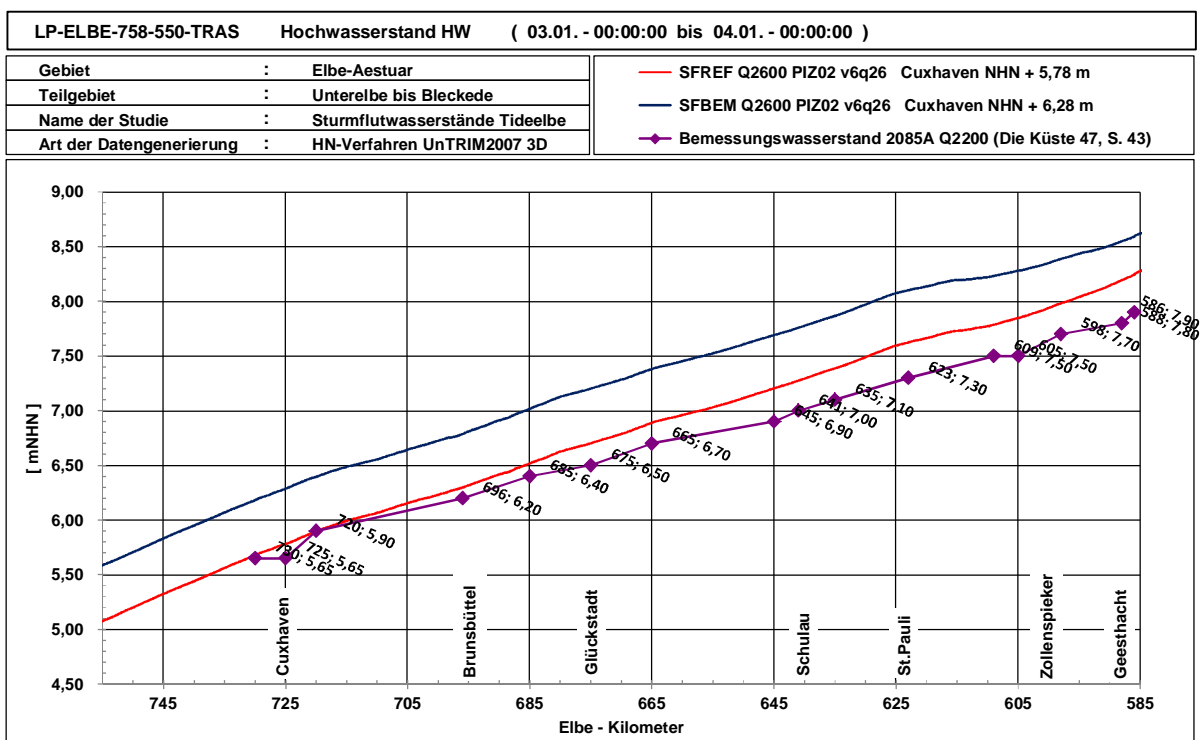


Bild 15: SFREF und SFBEM: Sturmflutscheitelwasserstand HW entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 755 (Elbmündung bei Bake Z) bis Elbe – km 585 (Geesthacht) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 (rot) und SFBEMQ2600 (blau). Zusätzlich ist der Bemessungswasserstand 2085A (violett, Länderarbeitsgruppe, 1988) eingetragen.

Bild 16 zeigt die Eintrittszeit THW des Sturmflutscheitelwasserstandes HW für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 auf einem Profil entlang des Elbefahrwassers

zwischen Elbe – km 748 und Elbe – km 585 (Geesthacht). Durch die Berücksichtigung eines Meeresspiegelanstieges von 50 cm im Szenario SFBEMQ2600 erhöht sich die Fortschrittsgeschwindigkeit der Tidewelle. In Hamburg St. Pauli (Elbe – km 623N) wird der Sturmflutscheitelwasserstand für das Szenario SFBEMQ2600 ca. 10 Minuten früher erreicht als für das Szenario SFREFQ2600.

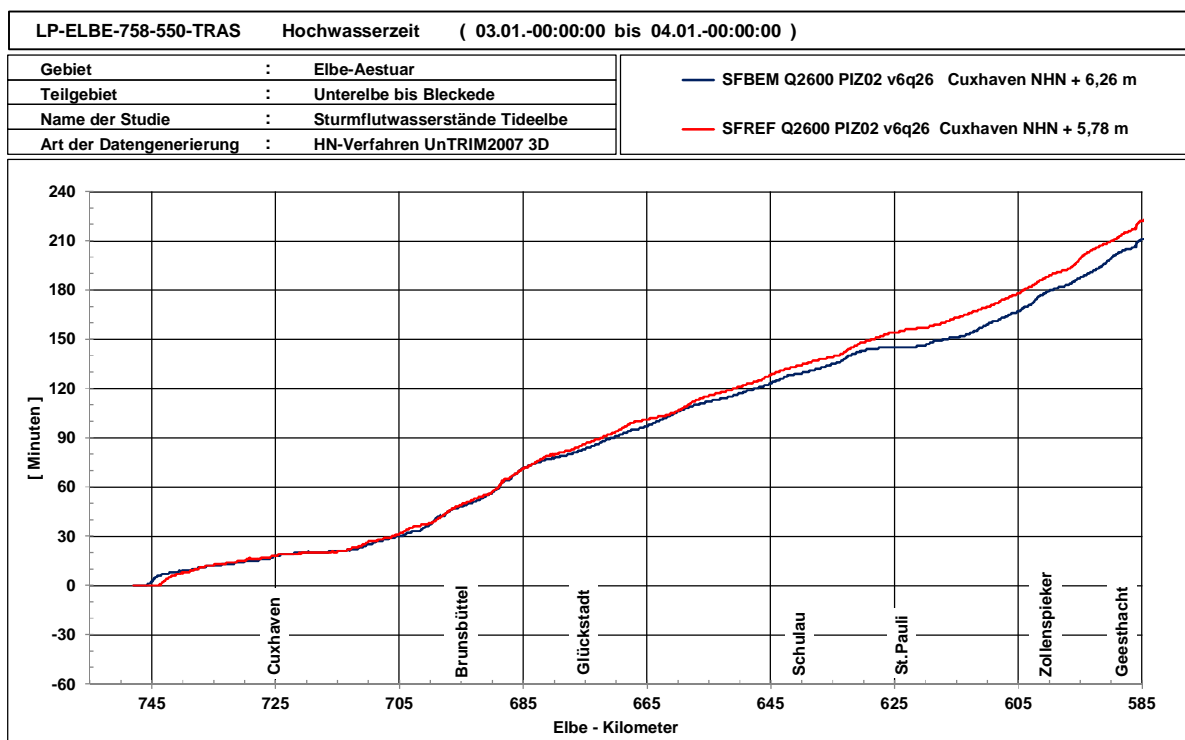


Bild 16: SFREF und SFBEM: Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstand THW entlang des Elbefahrtwassers von Elbe – km 748 (Elbmündung) bis Elbe – km 585 (Geesthacht) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 (rot) und SFBEMQ2600 (blau).

5.3 Flächenhafte Darstellung des Sturmflutscheitelwasserstandes

Für drei Teilgebiete, Teilgebiet West in der Mündung der Elbe zwischen Scharhörn und Glückstadt (Bild 17 und Bild 18), Teilgebiet Hamburg zwischen Schulau (Elbe – km 640) und Bunthaus (Elbe – km 609N) (Bild 19 und Bild 20) und Teilgebiet Ost zwischen Bunthaus und Geesthacht (Bild 21 und Bild 22), ist der Sturmflutscheitelwasserstand für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 flächenhaft dargestellt. Diese Darstellungen geben z. B. einen Überblick über den Sturmflutscheitelwasserstand entlang des Elbufers in den genannten Teilgebieten. Man erkennt, dass für das Gebiet stromauf von Brunsbüttel die entlang des Elbefahrtwassers dargestellten Sturmflutscheitelwasserstände (Bild 15) repräsentativ für den Scheitelwasserstand des jeweiligen Elbequerschnittes sind.

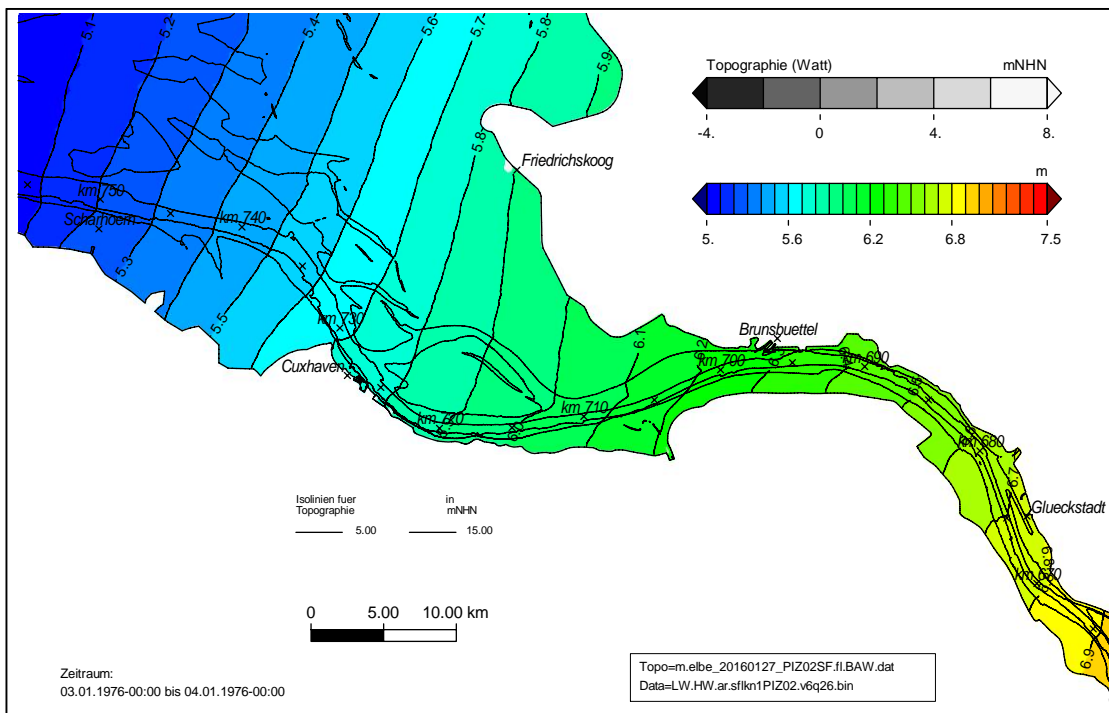


Bild 17: SFREF: Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario SFREFQ2600 im Teilgebiet West zwischen Scharhörn und Glückstadt. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 10 cm.

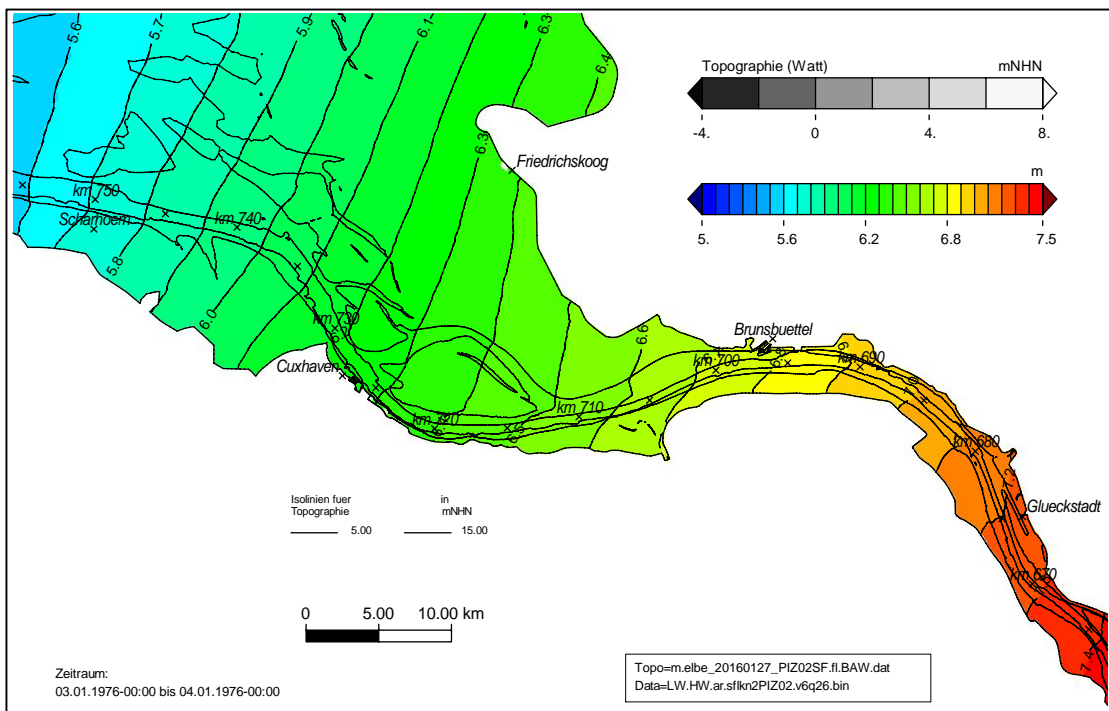


Bild 18: SFBEM: Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario SFBEMQ2600 im Teilgebiet West zwischen Scharhörn und Glückstadt. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 10 cm.

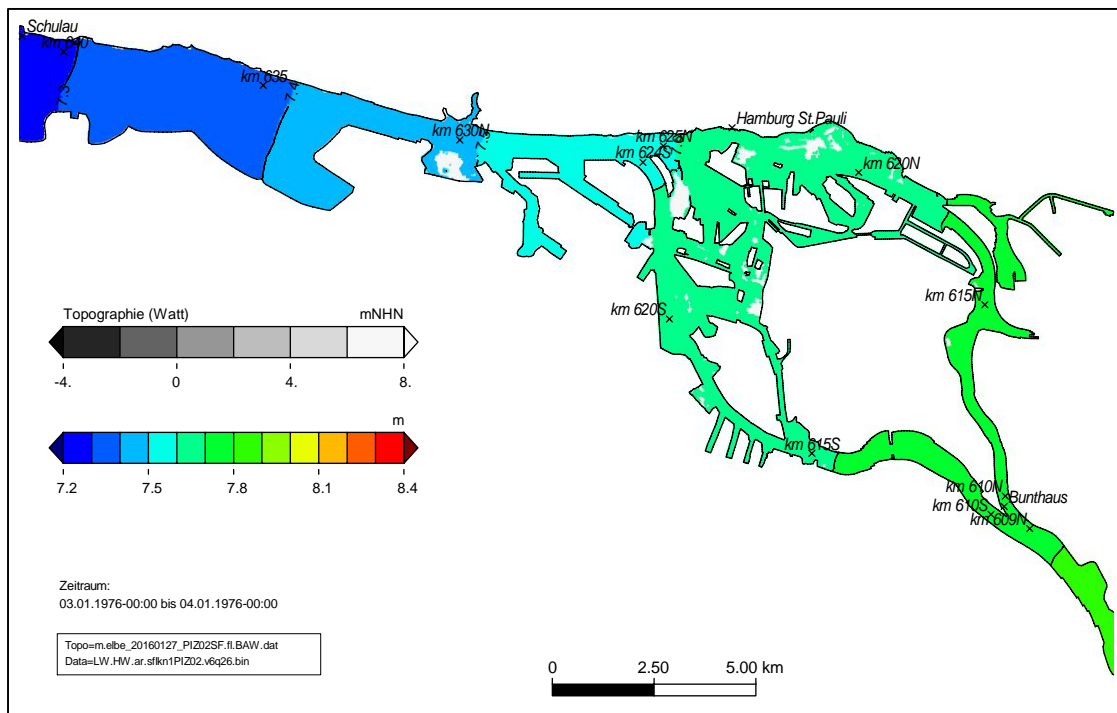


Bild 19: SFREF: Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario SFREFQ2600 im Teilgebiet Hamburg zwischen Schulau und Bunthaus. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 10 cm.

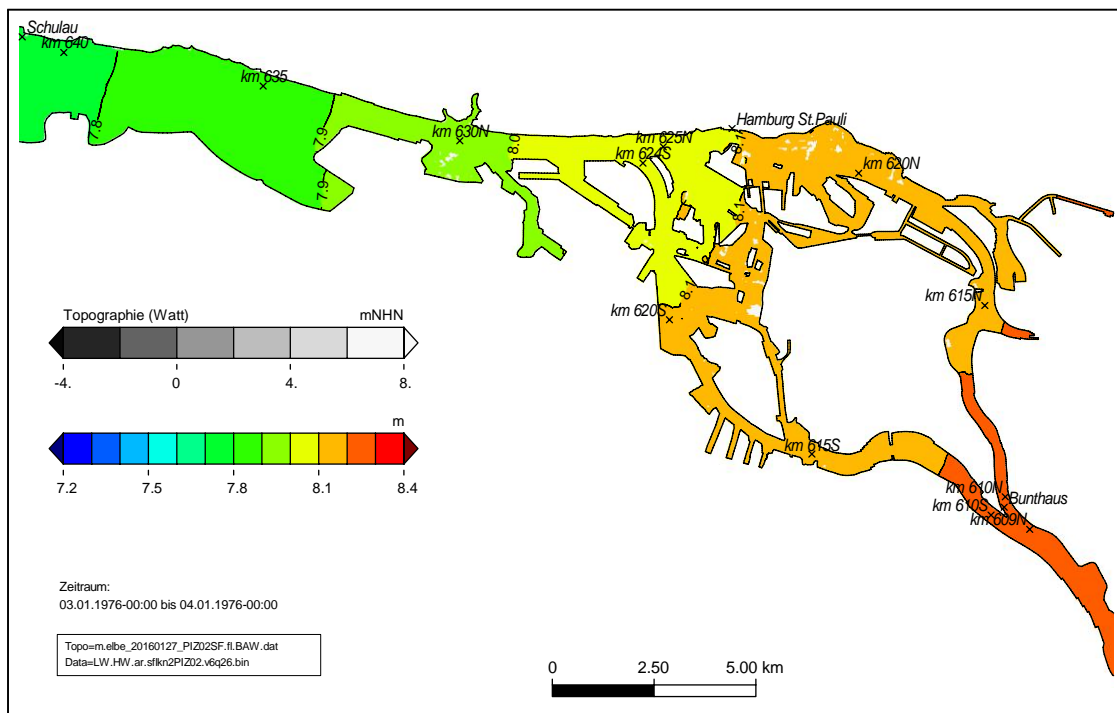


Bild 20: SFBEM: Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario SFBEMQ2600 im Teilgebiet Hamburg zwischen Schulau und Bunthaus. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 10 cm.

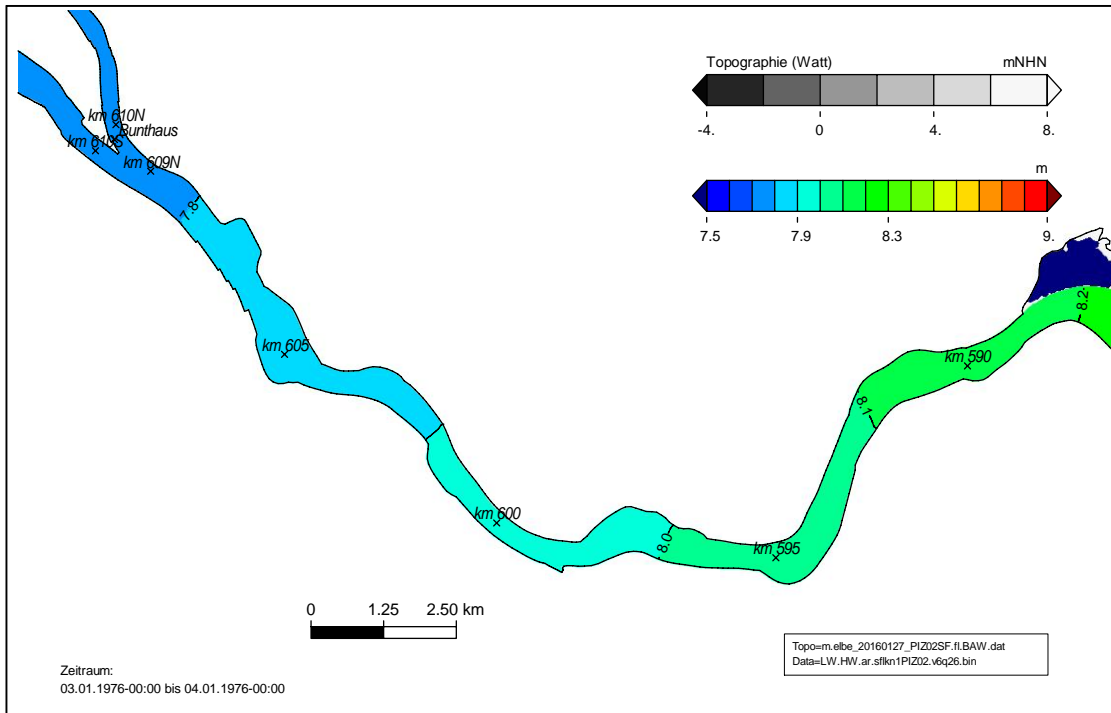


Bild 21: SFREF: Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario SFREFQ2600 im Teilgebiet Ost zwischen Bunthaus und Geesthacht. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 10 cm.

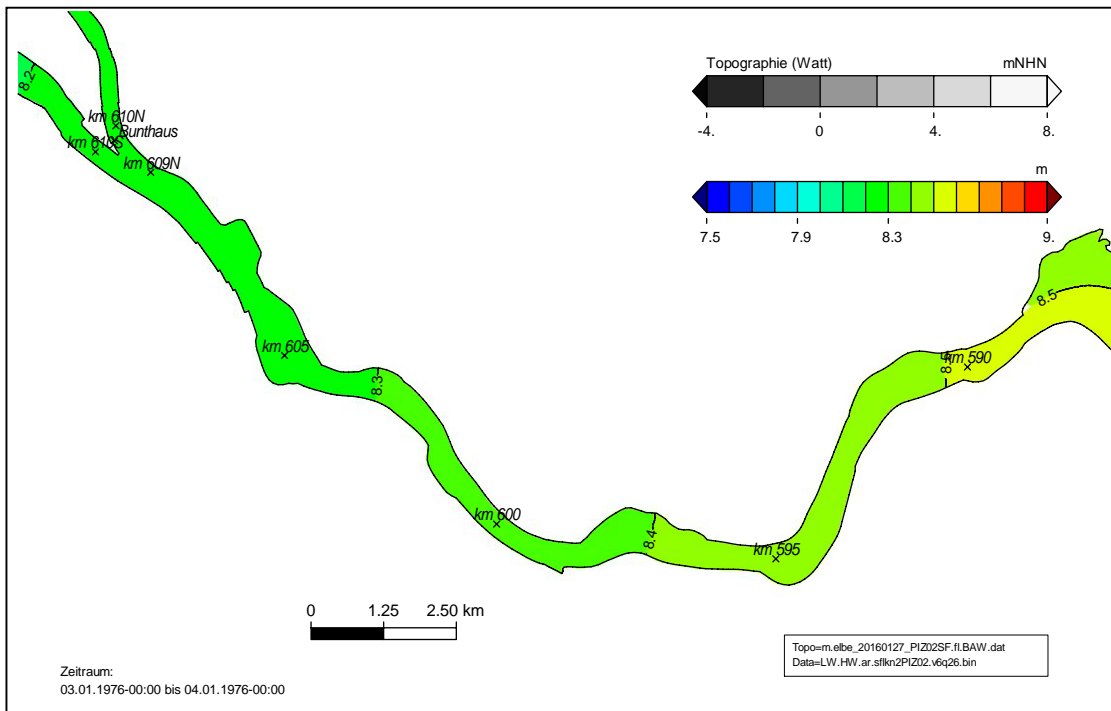


Bild 22: SFBEM: Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario SFBEMQ2600 im Teilgebiet Ost zwischen Bunthaus und Geesthacht. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 10 cm.

5.4 Bedeutung des Abflusses für die Sturmflutscheitelwasserstände

Um den Einfluss des Abflusses auf die Sturmflutscheitelwasserstände der Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 entlang der Tideelbe abzuschätzen, werden die Sturmflutszenarien zusätzlich mit veränderten Abflüssen modelliert. Hierfür wird als Abfluss vom Auftraggeber 2200 m³/s, 2700 m³/s, 3200 m³/s und 3700 m³/s gewählt. Eine Einordnung der gewählten Abflüsse ermöglicht Tabelle 1.

Bild 23 zeigt die Sturmflutscheitelwasserstände für die betrachteten Sturmflutszenarien entlang des Elbefahrwassers zwischen der Elbmündung (Elbe – km 755) und Geesthacht. Im Mündungsbereich werden die Sturmflutscheitelwasserstände nur geringfügig durch den veränderten Abfluss beeinflusst. Im Bereich zwischen Brunsbüttel und Hamburg St. Pauli führt der veränderte Abfluss zu einer Änderung des Sturmflutscheitelwasserstandes um einige Zentimeter an. Stromauf von Hamburg verändert sich der Sturmflutscheitelwasserstand bei den hier betrachteten Abflussvarianten um wenige Dezimeter.

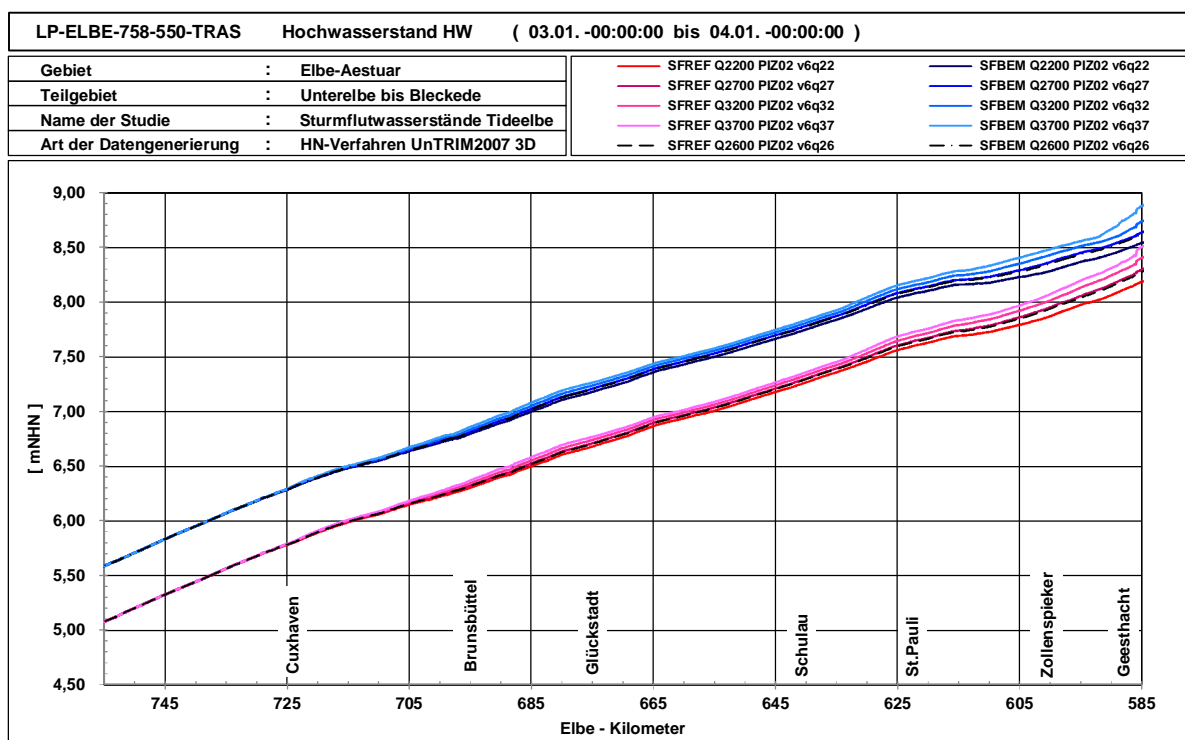


Bild 23: SFREF und SFBEM: Sturmflutscheitelwasserstand HW entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 755 (Elbmündung bei Bake Z) bis Elbe – km 585 (Geesthacht) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 (schwarz gestrichelt) und SFBEMQ2600 (schwarz strichpunktirt) sowie die genannten Abflüsse 2200 m³/s, 2700 m³/s, 3200 m³/s und 3700 m³/s (siehe auch Legende im Bild).

In Tabelle 2 sind für sieben ausgewählte Orte entlang der Elbe zwischen Cuxhaven (Elbe – km 725) und Geesthacht (Elbe – km 585) die Ergebnisse dieser Untersuchung zusammengefasst. Für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 sind die mit dem HN – Modell der Elbe bestimmten Sturmflutscheitelwasserstände angegeben. Für die Szenarien mit verändertem

Abfluss ist die Zunahme bzw. Abnahme des Sturmflutscheitelwasserstandes dHW eingetragen. Man erkennt auch hier die bereits beschriebenen Unterschiede in der Bedeutung des Abflusses für die Höhe der Sturmflutscheitelwasserstände. Während in der breiten Elbmündung bei Cuxhaven der Sturmflutscheitelwasserstand HW nicht durch den Abfluss Q verändert wird, hebt im Bereich stromauf von Hamburg z. B. eine Zunahme des Abflusses um 1000 m³/s den Sturmflutscheitelwasserstand um mehr als 2 Dezimeter an.

	SFREF	SFREF	SFREF	SFREF	SFREF	SFBEM	SFBEM	SFBEM	SFBEM	SFBEM
	Q2600	Q2200	Q2700	Q3200	Q3700	Q2600	Q2200	Q2700	Q3200	Q3700
	HW	dHW	dHW	dHW	dHW	HW	dHW	dHW	dHW	dHW
	[mNHN]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[mNHN]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
Cuxhaven km 725	5,78	0	0	0	0	6,28	0	0	0	< 1
Brunsbüttel km 696	6,30	- 1	0	+ 2	+ 5	6,79	- 1	0	+ 2	+ 4
Glückstadt km 675	6,70	- 2	0	+ 4	+ 6	7,20	- 2	0	+ 3	+ 6
Schulau km 641	7,27	- 3	0	+ 4	+ 6	7,76	- 3	0	+ 3	+ 6
St.Pauli km 623N	7,62	- 3	+ 1	+ 5	+ 9	8,10	- 3	0	+ 4	+ 8
Zollenspieker km 598	7,98	- 7	+ 1	+ 8	+ 14	8,37	- 5	+ 3	+ 9	+ 15
Geesthacht km 585	8,28	- 9	+ 2	+ 12	+ 23	8,62	- 8	+ 2	+ 12	+ 26

Tabelle 2: Sturmflutscheitelwasserstände HW für SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 an ausgewählten Orten entlang der Tideelbe sowie die Änderung der Sturmflutscheitelwasserstände dHW aufgrund einer Ab- bzw. Zunahme des Abflusses Q.

Für sieben ausgewählte Orte entlang der Tideelbe sind die dieser Analyse zugrundeliegenden Wasserstandsverläufe für den Zeitraum 1. Januar 12.00 Uhr bis 4. Januar 12:00 Uhr (Datum ohne Bedeutung) in Bild 24 bis Bild 30 dargestellt. Bei Cuxhaven, im Mündungsbereich der Elbe (Elbe – km 725, Bild 24) wird der Wasserstand vor und während der Sturmflut weder bei Sturmflutszenario SFREFQ2600 noch bei SFBEMQ2600 durch eine Zunahme des Abflusses verändert. Auch bei Brunsbüttel (Elbe – km 696, Bild 25) lässt sich kein Einfluss des Abflusses auf den Wasserstand erkennen. Bei Glückstadt (Elbe – km 675, Bild 26) findet man einen geringen Einfluss auf die Tidehochwasser Thw und Tideniedrigwasser Tnw vor der Sturmflut sowie auf den Sturmflutscheitelwasserstand HW. Dieser Einfluss ist deutlicher in Schulau (Elbe – km 641, Bild 27) und Hamburg St. Pauli (Elbe – km 623N, Bild 28) zu erkennen. Stromauf von Hamburg bei Zollenspieker (Elbe – km 598, Bild 29) und Geesthacht (Elbe – km 585, Bild 30) beeinflusst der Abfluss deutlich Thw und Tnw vor der Sturmflut sowie den Sturmflutscheitelwasserstand HW (siehe auch Rudolph, E., 2005). Mit steigendem Abfluss wird im Bereich von Geesthacht der Einfluss des Meeresspiegelanstieges auf Thw und Tnw vor der Sturmflut kleiner.

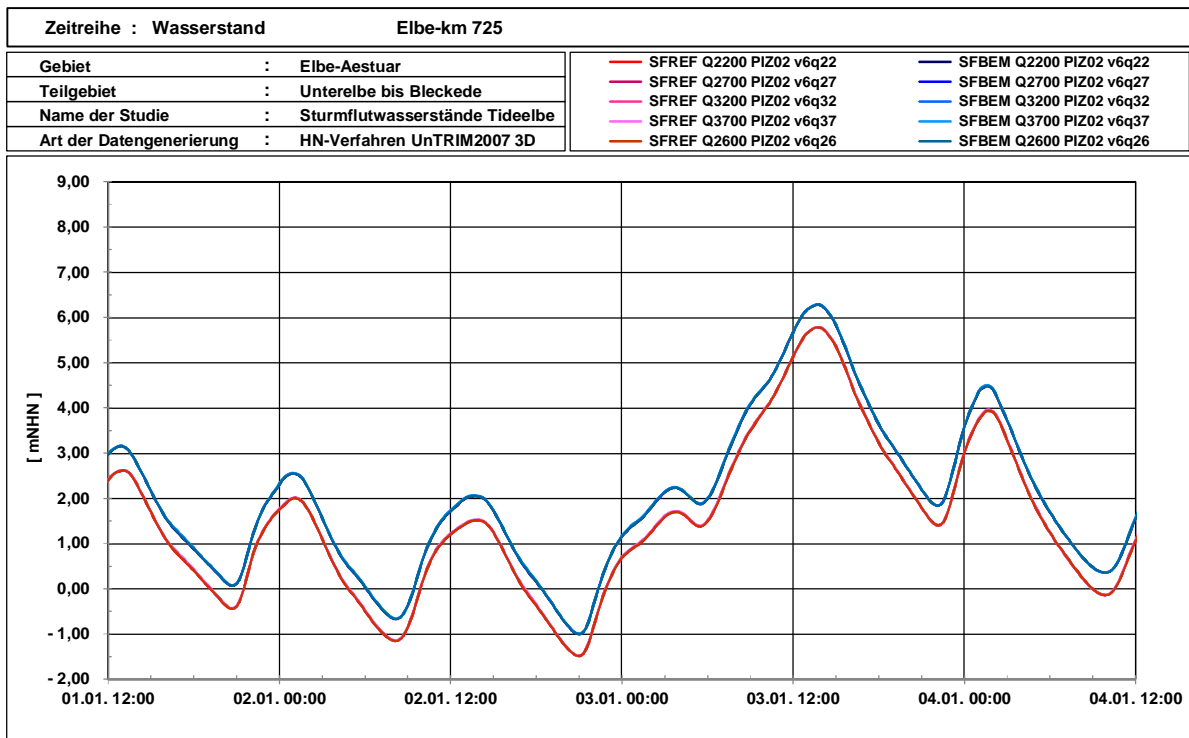


Bild 24: SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 725 (Cuxhaven) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit Abflussvarianten.

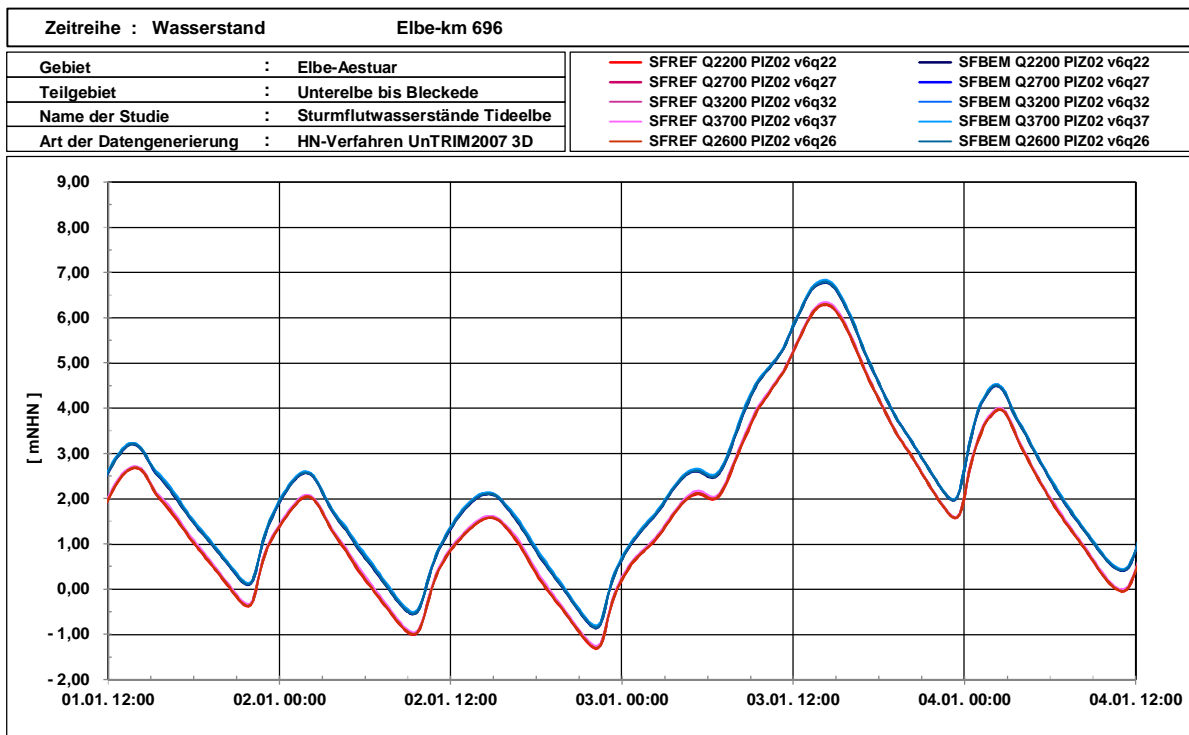


Bild 25: SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 696 (Brunsbüttel) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit Abflussvarianten.

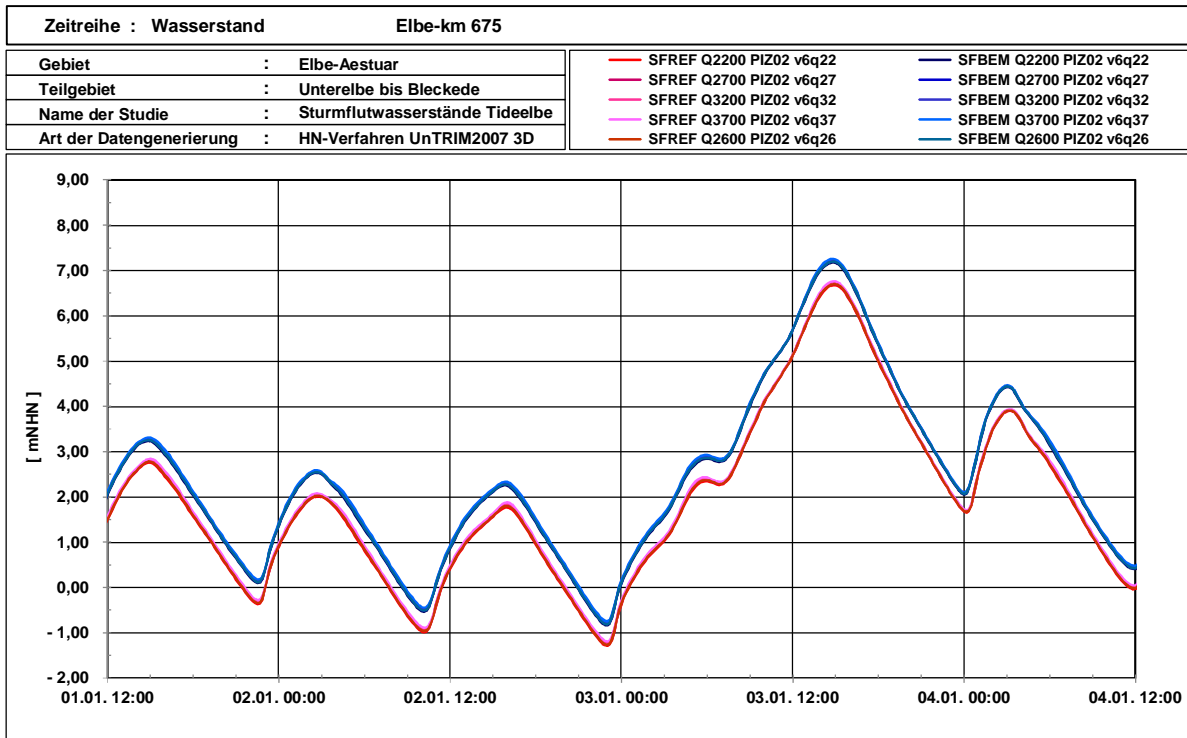


Bild 26: SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 675 (Glückstadt) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit Abflussvarianten.

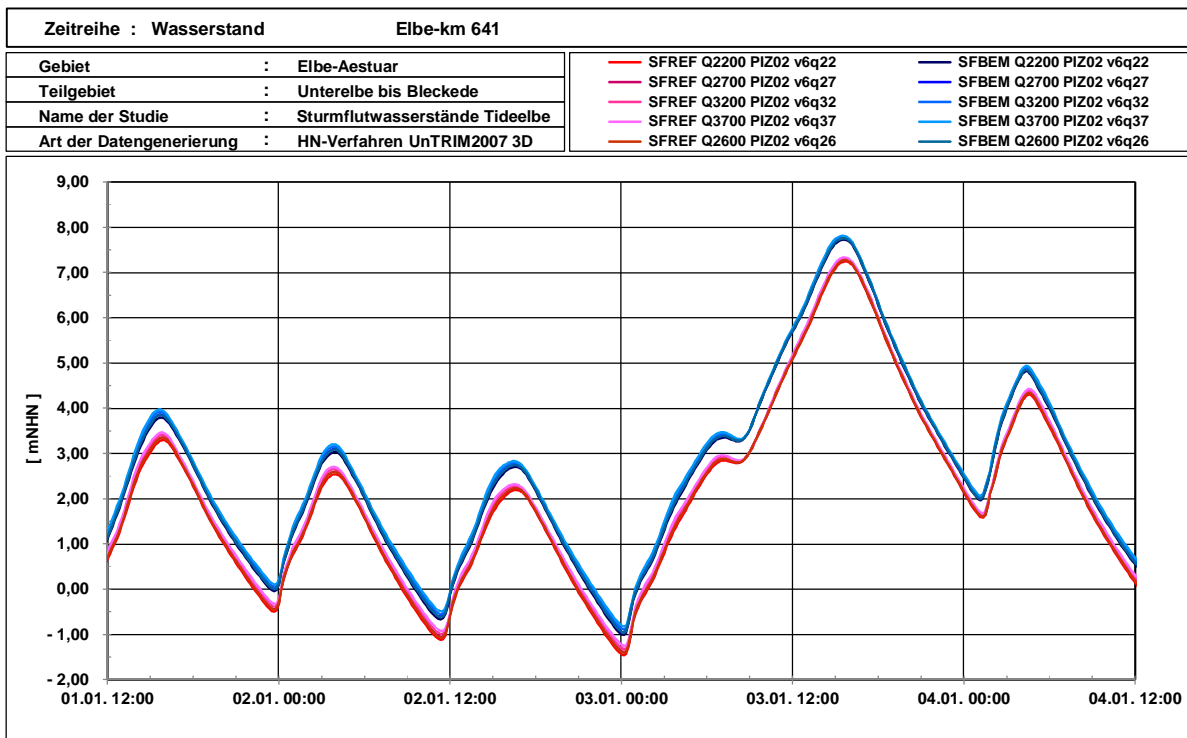


Bild 27: SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 641 (Schulau) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit Abflussvarianten.

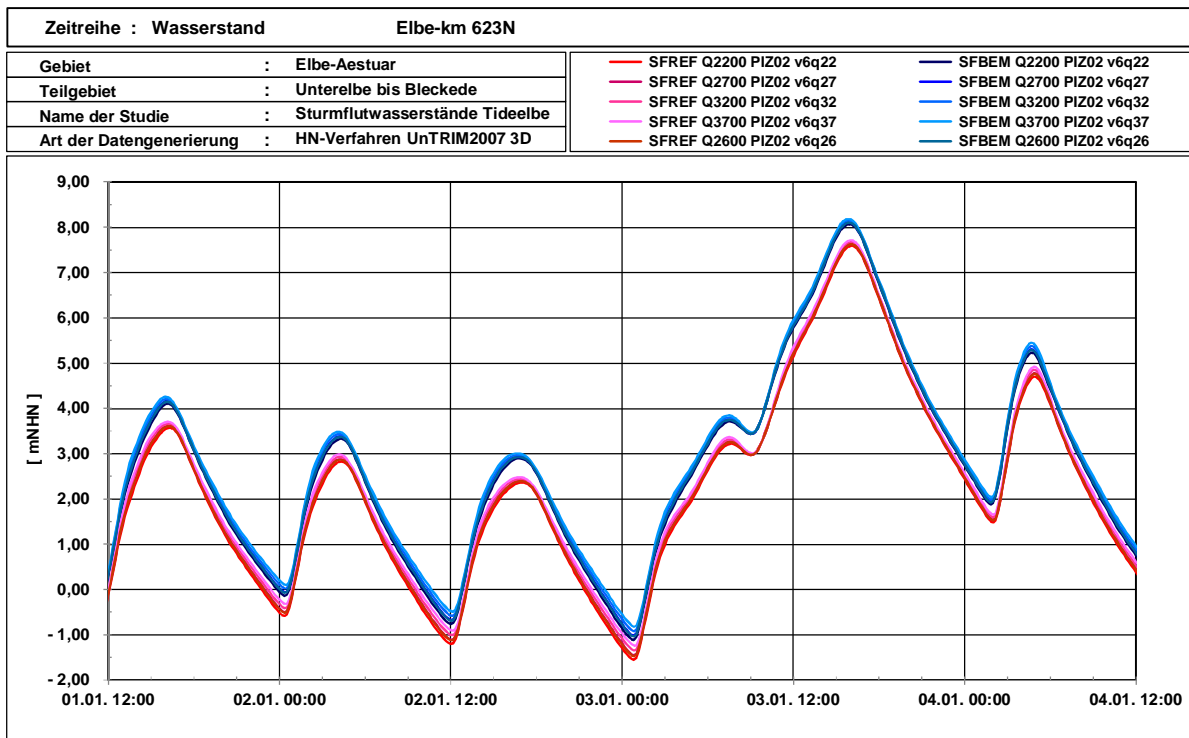


Bild 28: SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 623N (Hamburg St. Pauli) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit Abflussvarianten.

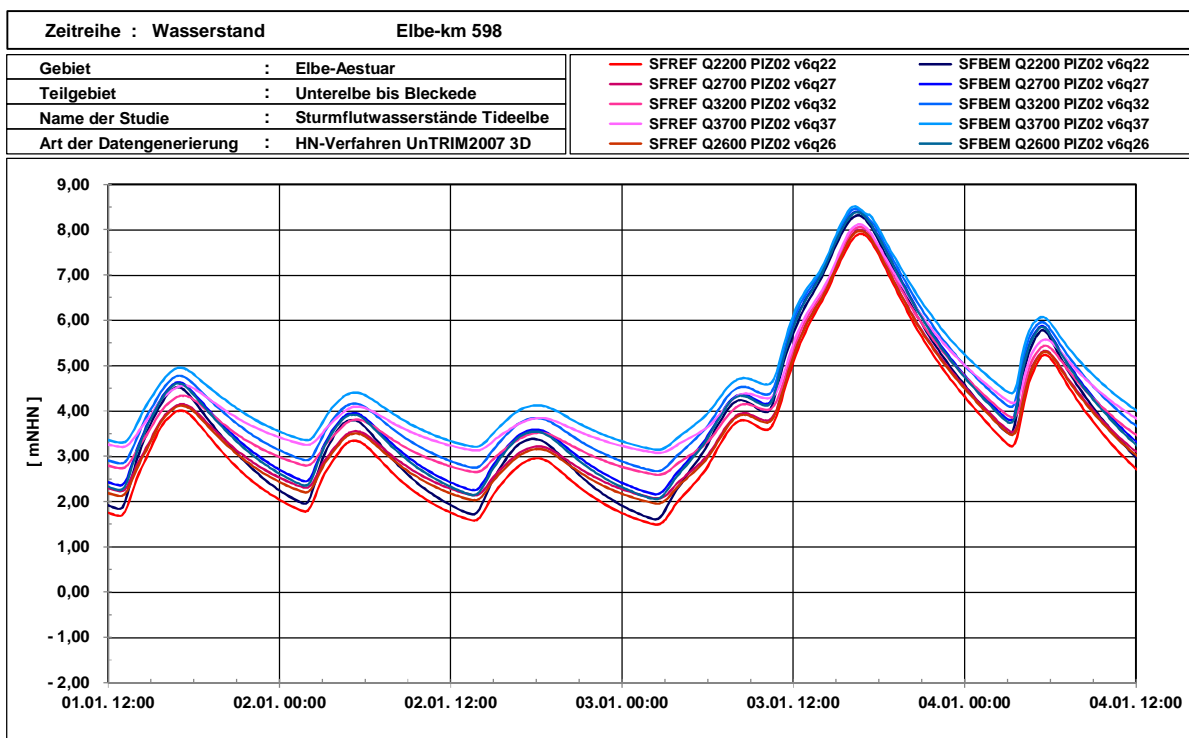


Bild 29: SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 598 (Zollenspieker) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit Abflussvarianten.

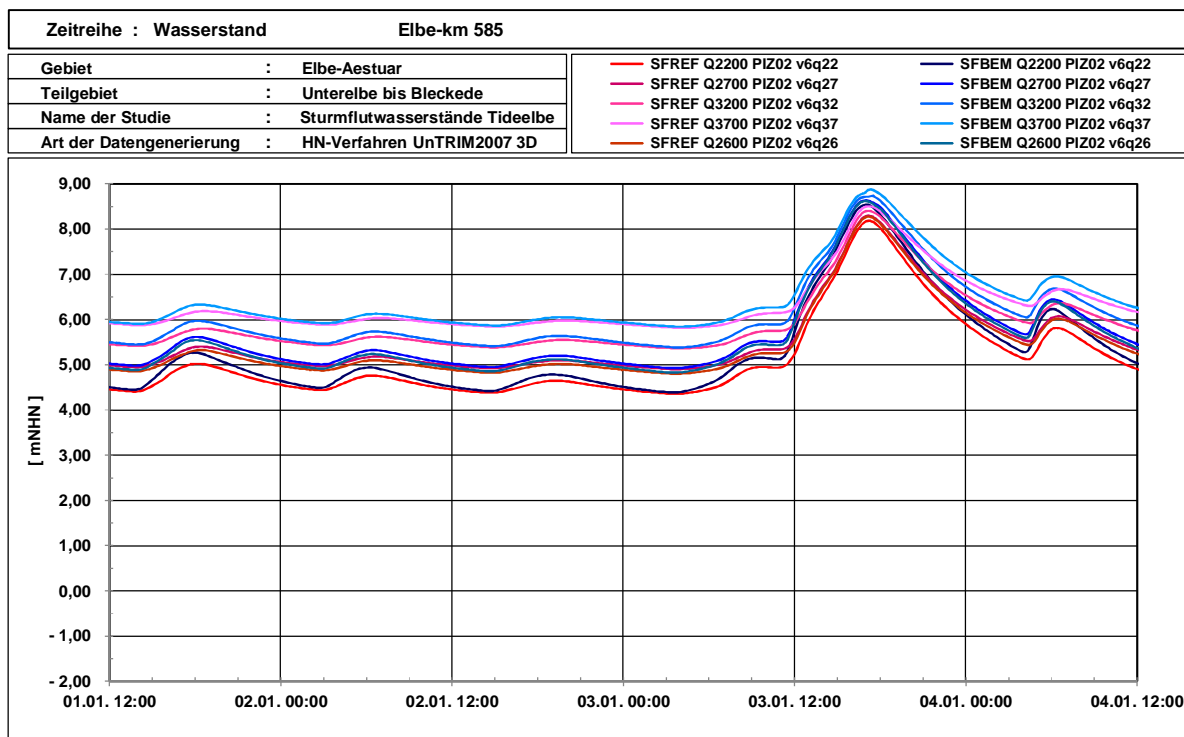


Bild 30. SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 585 (Geesthacht) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit Abflussvarianten.

6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die für die Überprüfung des Sicherheitsstatus der Hochwasserschutzanlagen und für die Bemessung von Deichverstärkung und –neubauten benötigten Sturmflutwasserstände werden nach Vorgaben des Auftraggebers für Cuxhaven (Elbe – km 725) von der BAW mit einem hochauflösenden HN – Modell der Elbe (UnTRIM) entlang der Tideelbe ermittelt.

Die vom Auftraggeber vorgegebene Wasserstandszeitreihe Cuxhaven der Referenzflut beinhaltet die Springtide des 10. September 2006, den modifizierten Windstau der Sturmflut 3. Januar 1976 und die modifizierte Fernwelle des 18. Januar 1993 und weist hier einen maximalen Scheitelwert von NHN + 5,78 m auf. Der Bemessungswasserstand enthält zusätzlich einen Klimazuschlag von 50 cm und erreicht somit NHN + 6,28 m. Der Windverlauf soll der Windentwicklung während der Sturmflut vom 3. Januar 1976 entsprechen. Als Abfluss der Elbe wird 2600 m³/s vorgegeben. Die beiden Sturmflutszenarien, die sich aus den Vorgaben des Auftraggebers ergeben, werden SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 genannt.

	HW Cuxhaven km 725 [mNHN]	HW Brunsbüttel km 696 [mNHN]	HW Glückstadt km 675 [mNHN]	HW Schulau km 641 [mNHN]	HW St.Pauli km 623N [mNHN]	HW Zollenspieker km 598 [mNHN]	HW Geesthacht km 585 [mNHN]	Q Neu Darchau km 536 [m ³ /s]
SFREFQ2600	5,78	6,30	6,70	7,27	7,62	7,98	8,28	2600
SFBEMQ2600	6,28	6,79	7,20	7,76	8,10	8,37	8,62	2600
SF76	5,10 ^G	5,42 ^{SH}	5,83 ^G	6,24 ^P	6,45 ^G	6,35 ^G	6,43 ^P	500
SF94	4,49 ^G	4,79 ^P	5,17 ^G	5,75 ^P	6,02 ^G	6,27 ^G	6,54 ^P	1350
SFB2085A	5,65 ^L	6,20 ^L	6,50 ^L	7,00 ^L	7,30 ^L	7,70 ^L	7,90 ^L	2200

Tabelle 3: Sturmflutscheitelwasserstände HW für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600, die Sturmfluten 3. Januar 1976 (SF76) und 28. Januar 1994 (SF94) sowie die Bemessungssturmflut 2085A an sieben Orten entlang der Tideelbe. (Datenquelle: G: DGJ (2015), P: Portal - Tideelbe (2011), SH: MLUR - SH (S. 51, 2001), L: Länderarbeitsgruppe (1988)).

Die Ergebnisse der von der BAW mit dem HN – Modell der Elbe (UnTRIM) durchgeführten Untersuchung sind zusammenfassend in Tabelle 3 dargestellt. Zum Vergleich sind zusätzlich zu den Sturmflutscheitelwasserständen der Szenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 die gemessenen Sturmflutscheitelwasserstände der Sturmfluten vom 3. Januar 1976 (SF76) und 28. Januar 1994 (SF94) (DGJ, 2015) sowie die Bemessungswasserstände 2085A (Länderarbeitsgruppe, 1988) eingetragen.

Für das Sturmflutszenario SFREFQ2600 steigt der Sturmflutscheitelwasserstand von NHN + 5,78 m bei Cuxhaven um ca. 180 cm auf NHN + 7,62 m in Hamburg St. Pauli. Für das

Sturmflutszenario SFBEMQ2600 steigt der Sturmflutscheitelwasserstand von NHN + 6,28 m bei Cuxhaven um ebenfalls ca. 180 cm auf NHN + 8,10 m in Hamburg St. Pauli. Die im Anhang 8.3 (Seite 39 ff.) dargestellte Sensitivitätsstudie zeigt, dass Veränderungen in der Kombination der Randwerte „Wind über dem Elbeästuar“ und „Wasserstandsentwicklung am Rand zur Nordsee“ die Sturmflutscheitelwasserstände entlang der Tideelbe um ± 10 cm verändern können (Bild 46). Der Sturmflutscheitelwasserstand des Sturmflutszenarios SFBEMQ2600 tritt in Hamburg St. Pauli ca. 10 Minuten früher ein als für das Sturmflutszenario SFREFQ2600.

Bundesanstalt für Wasserbau
Hamburg, 12. April 2018

Im Auftrag

Bearbeiterin

gez. Winkel

gez. Rudolph

Dr. rer. nat. Winkel

Dr. rer. nat. Rudolph

7 Literaturverzeichnis

- BAW (2002): Tideunabhängige Kennwerte des Wasserstandes. Technischer Bericht. BAWiki [http://wiki.baw.de/de/index.php5/Tideunabh%c3%a4ngige Kennwerte des Wasserstands](http://wiki.baw.de/de/index.php5/Tideunabh%c3%a4ngige_Kennwerte_des_Wasserstands) (abgerufen Oktober 2017).
- BAW (2004): Validation document – Mathematical – Model UnTRIM. Bericht. BAWiki [http://wiki.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische_verfahren/pdf/Simulationsverfahren Kueste validation document-untrim-2004.pdf](http://wiki.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische_verfahren/pdf/Simulationsverfahren_Kueste_validation_document-untrim-2004.pdf)
- BAWiki: Postprozessor LZKWF. <http://wiki.baw.de/de/index.php/LZKWF> (abgerufen Oktober 2017)
- Casulli, V. und Walters, R. A. (2000): An unstructured, three dimensional model based on the shallow water equations. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 32. S. 331 – 348.
- DGJ (1997): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch – Elbegebiet, Teil III, Untere Elbe ab der Havelmündung, Abflussjahr 1994. Freie und Hansestadt Hamburg – Wirtschaftsbehörde – Strom- und Hafenbau.
- DGJ (2015): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch – Elbegebiet, Teil III, Untere Elbe ab der Havelmündung, Abflussjahr 2013. Freie und Hansestadt Hamburg – HPA Hamburg Port Authority AöR.
- Länderarbeitsgruppe (1988): Bemessungswasserstände entlang der Elbe – Bericht einer Länderarbeitsgruppe. Die Küste, 47. S. 31 – 50.
- MLUR-SH (2001): Generalplan Küstenschutz – Integriertes Küstenschutzmanagement in Schleswig – Holstein. Ministerium für ländliche Räume, Landesplanung, Landwirtschaft und Tourismus des Landes Schleswig – Holstein. Kiel.
- MELUND-SH (2018): Eintrittswahrscheinlichkeit des gemeinsamen Auftretens schwerer Sturmfluten und Flusshochwasser in der Elbe. Persönliche Mitteilung.
- Plüß, A. (2003): Das Nordseemodell der BAW zur Simulation der Tide in der Deutschen Bucht. Die Küste, 67. S. 83-127.
- PORTAL TIDEELBE - Zentrales Datenmanagement der WSD Nord. <http://www.portaltideelbe.de/> (abgerufen Juli 2011)
- Rudolph, E. (2005): Einfluss sehr hoher Abflüsse auf die Wasserstände in der Tideelbe. promet, 31, 2-4, S. 186 – 190.

Schmidt, H. und Pätsch, J. (1992): Meteorologische Messungen auf Norderney und Modellrechnungen. Die Küste, 54 S. 131 – 142.

Smith, S. D und Banke, E. G. (1975): Variation of Sea Surface Drag Coefficient with Wind Speed. Quart. J. of the Roy. Met. Soc. 101. S. 665 – 673.

WSA Lauenburg (2017): Staustufe Geesthacht

http://www.wsa-lauenburg.wsv.de/wasserstrassen/elbe/Staustufe_Geesthacht/index.html

(abgerufen November 2017)

8 Anhang

8.1 Rauheitsverteilung

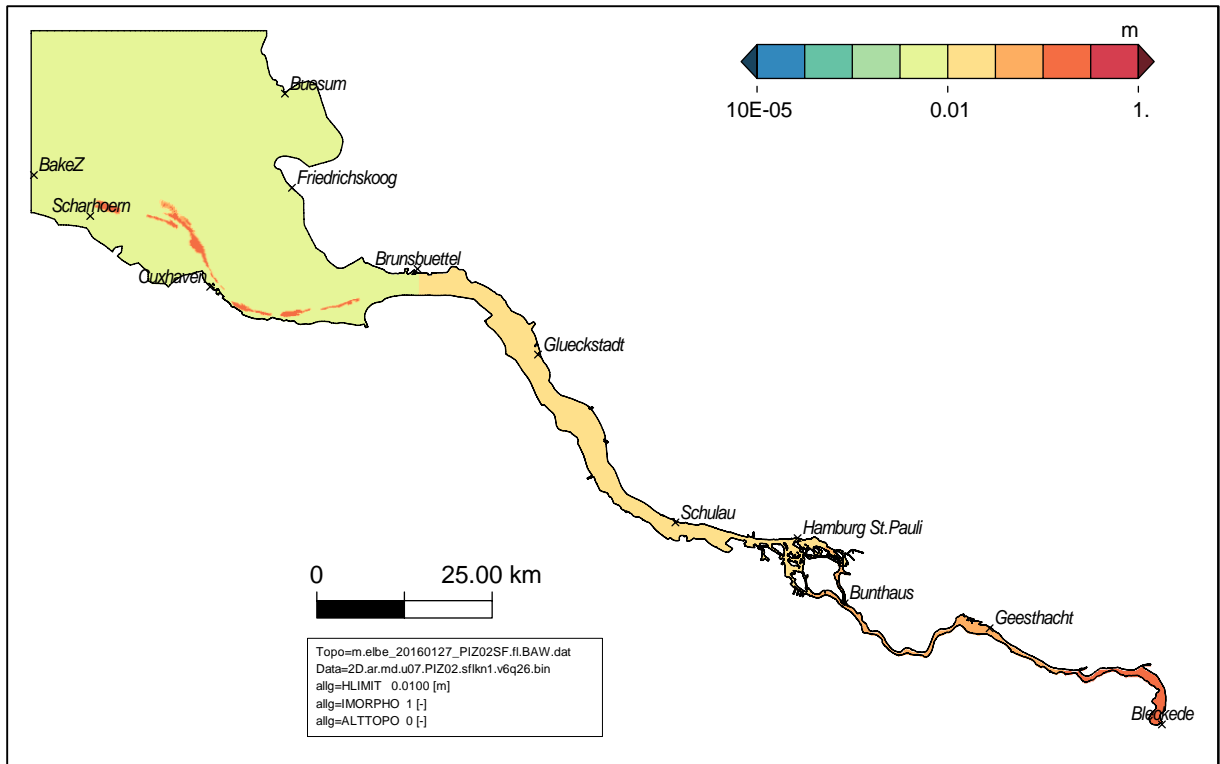


Bild 31: Effektive Sohlrauheit (auch ks nach Nikuradse genannt) im verwendeten HN – Modell des Elbeästuares.

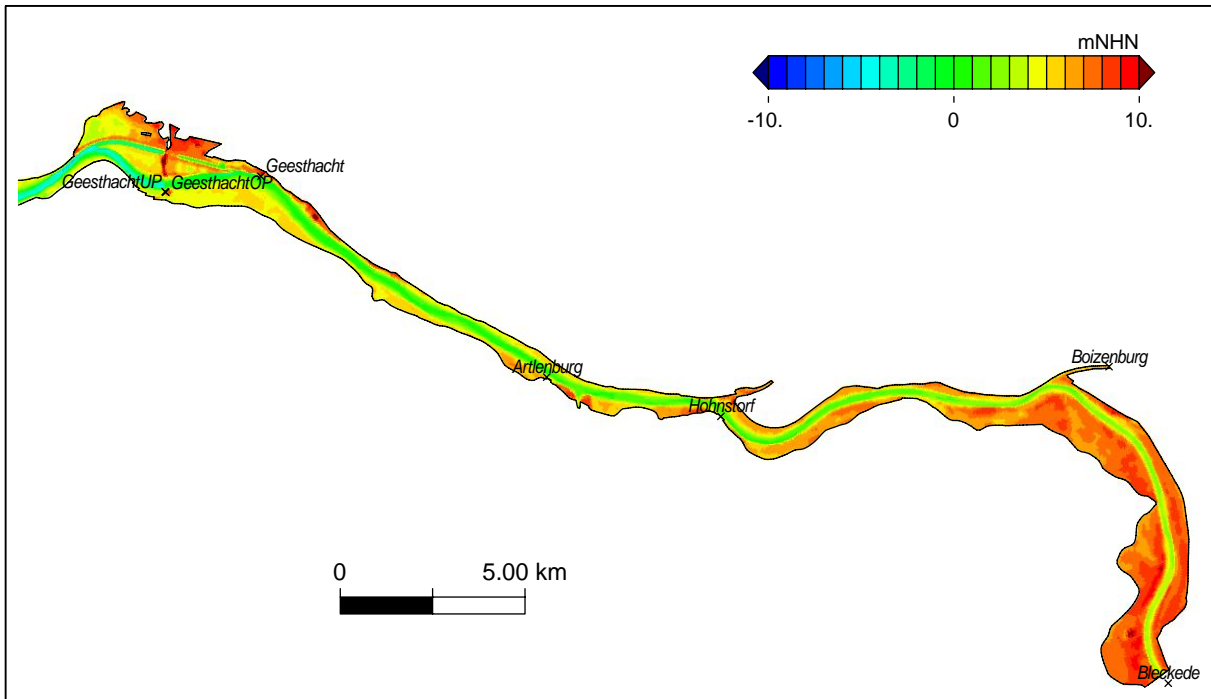


Bild 32: Topographie des numerischen Modells des Elbeästuares der BAW für Sturmflutuntersuchungen (PIZ02) für den Bereich stromauf von Geesthacht mit ausgewählten Pegelorten (Grundlage: Jahrespeilung 2010). Ausschnitt aus Bild 2 jedoch unter Verwendung einer veränderten Farbpalette.

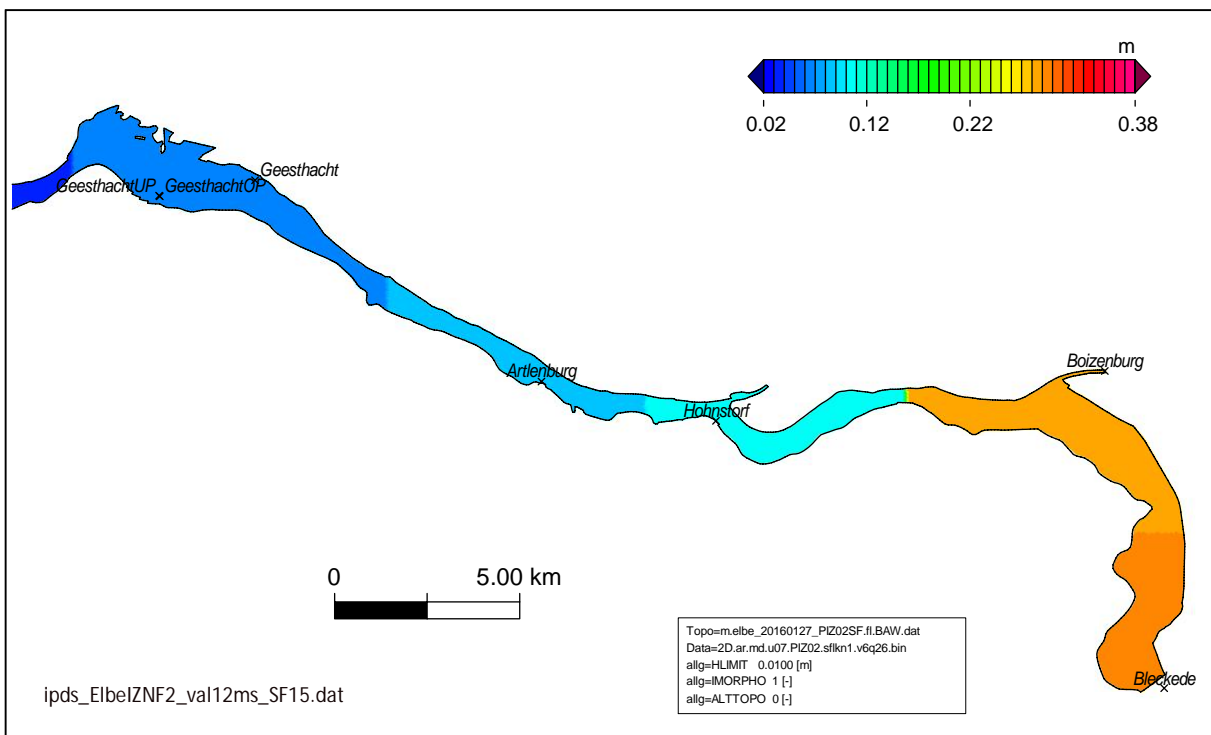


Bild 33: Effektive Sohlrauheit (auch k_s nach Nikuradse genannt) im verwendeten HN – Modell des Elbeästuares für den Bereich stromauf von Geesthacht. Ausschnitt aus Bild 31 jedoch unter Verwendung einer höher aufgelösten Farbpalette.

8.2 Sensitivitätsstudie Salzgehaltsanfangsverteilung

Die räumliche Verteilung des Salzgehaltes im Elbeästuar wird sowohl durch den Abfluss aus der Mittelelbe als auch durch das Tidegeschehen in der Nordsee beeinflusst. Hohe Abflüsse aus der Mittelelbe führen zu niedrigen Salzgehalten entlang der Tideelbe. Hierbei ist auch die Dauer des Abflussereignisses von Bedeutung. Für die in diesem Gutachten betrachteten Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 wird keine Vorgeschichte des Abflusses festgelegt. In Absprache mit dem Auftraggeber wird angenommen, dass während der Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 auf dem offenen Rand zur Nordsee ein Salzgehalt von 30 PSU vorliegt. Die in den Modellläufen verwendete Salzgehaltsverteilung zu Beginn (1. Januar 02:00 Uhr) des Simulationszeitraumes (1. Januar 02:00 Uhr bis 4. Januar 23:00 Uhr) ist in Bild 34 dargestellt.

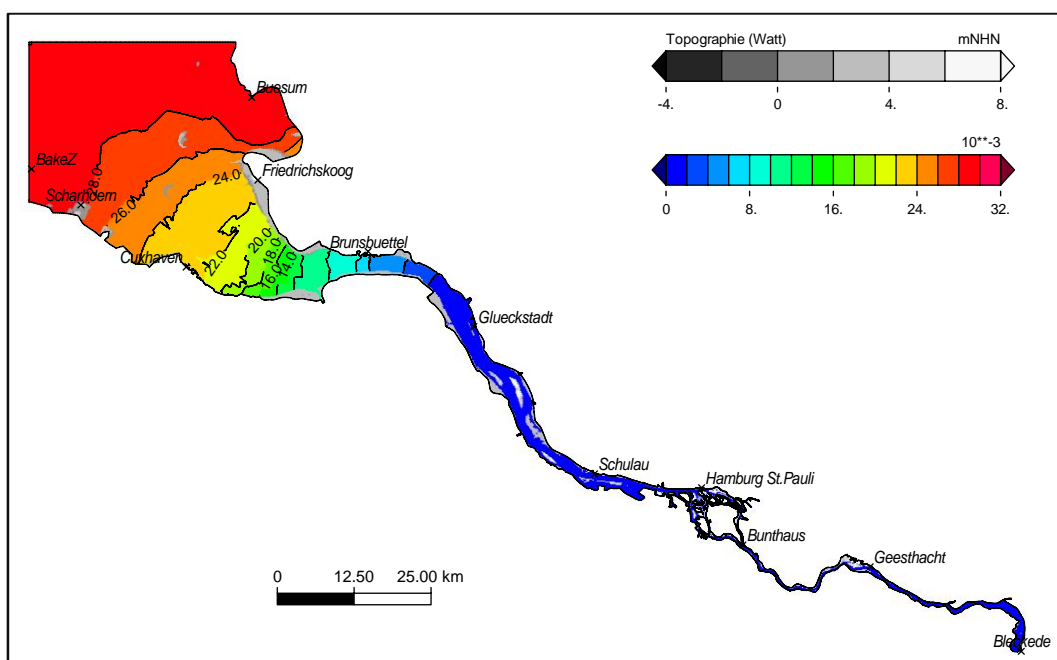


Bild 34: Salzgehaltsverteilung zu Beginn des Simulationszeitraumes für die untersuchten Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit einem Salzgehalt von 30 PSU am Rand zur Nordsee.

Da der Salzgehalt die Dichte des Wassers beeinflusst, beeinflusst der Salzgehalt auch die Wasserstandsverteilung entlang der Tideelbe. Es wird deshalb untersucht, welchen Einfluss ein veränderter Salzgehalt im Elbmündungsgebiet auf die Sturmflutscheitelwasserstände entlang der Tideelbe hat. Hierfür wird von einem Salzgehalt von 28 PSU sowie 25 PSU am Modellrand ausgegangen und die in Bild 35 bzw. Bild 36 dargestellten Salzverteilungen zu Beginn des Simulationszeitraumes verwendet.

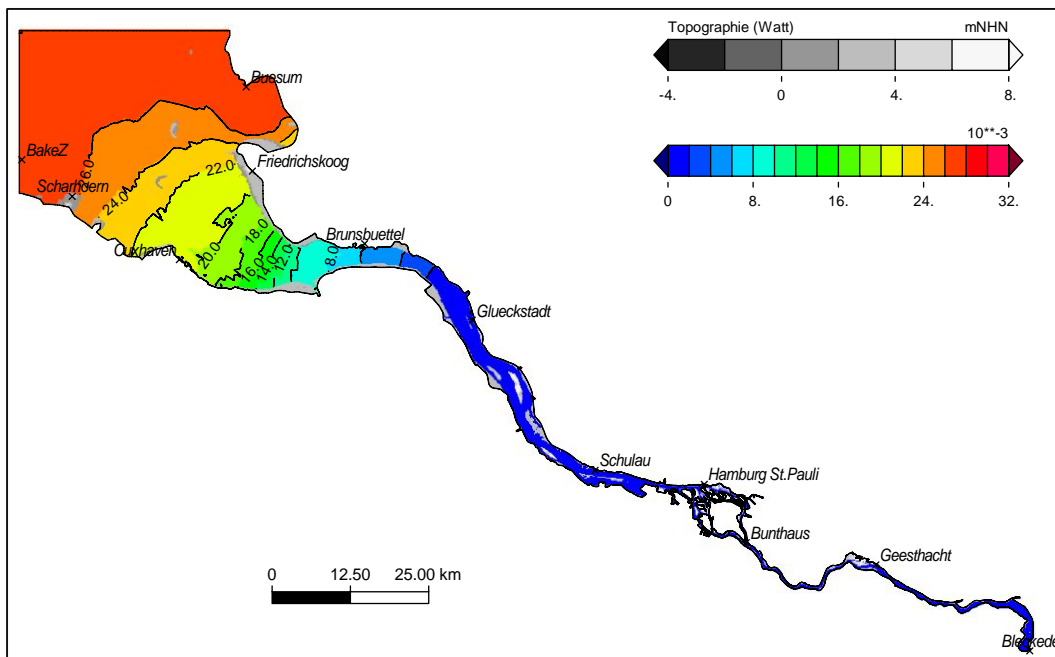


Bild 35: Salzgehaltsverteilung zu Beginn des Simulationszeitraumes für die untersuchten Sturmflutszenarien SFREFQ2600S28 und SFBEMQ2600S28 mit einem Salzgehalt von 28 PSU am Rand zur Nordsee.

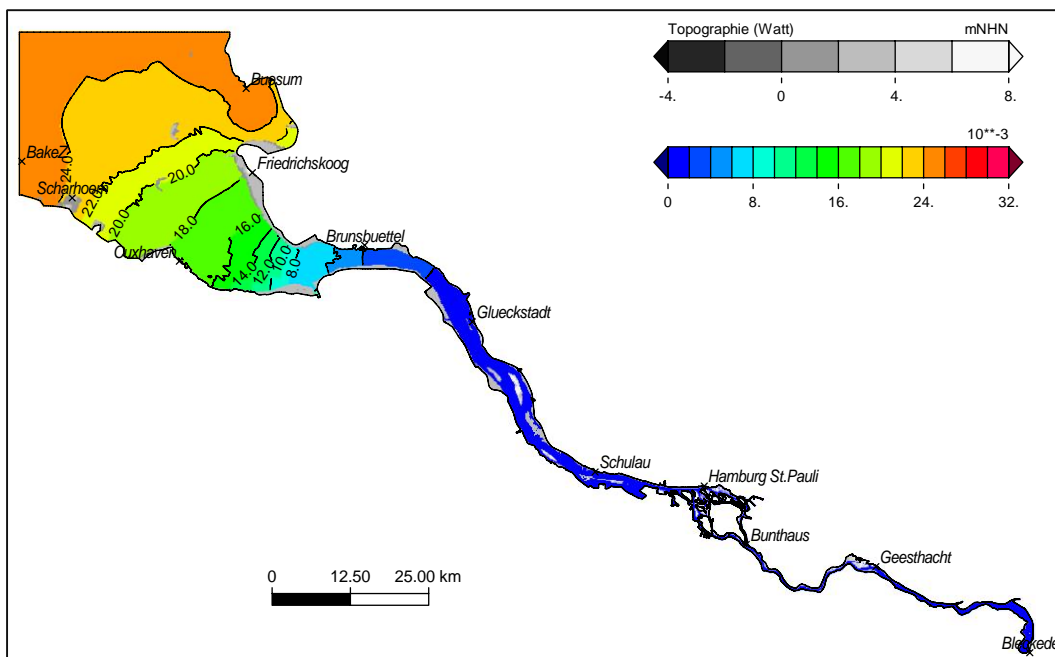


Bild 36: Salzgehaltsverteilung zu Beginn des Simulationszeitraumes für die untersuchten Sturmflutszenarien SFREFQ2600S25 und SFBEMQ2600S25 mit einem Salzgehalt von 25 PSU am Rand zur Nordsee.

Die Wasserstandsentwicklung bei Elbe - km 725 (Cuxhaven) und Elbe - km 641 (Schulau) für die drei beschriebenen Salzsznarien sind in Bild 37 und Bild 38 dargestellt. Man erkennt lediglich kleine Unterschiede in den modellierten Wasserständen.

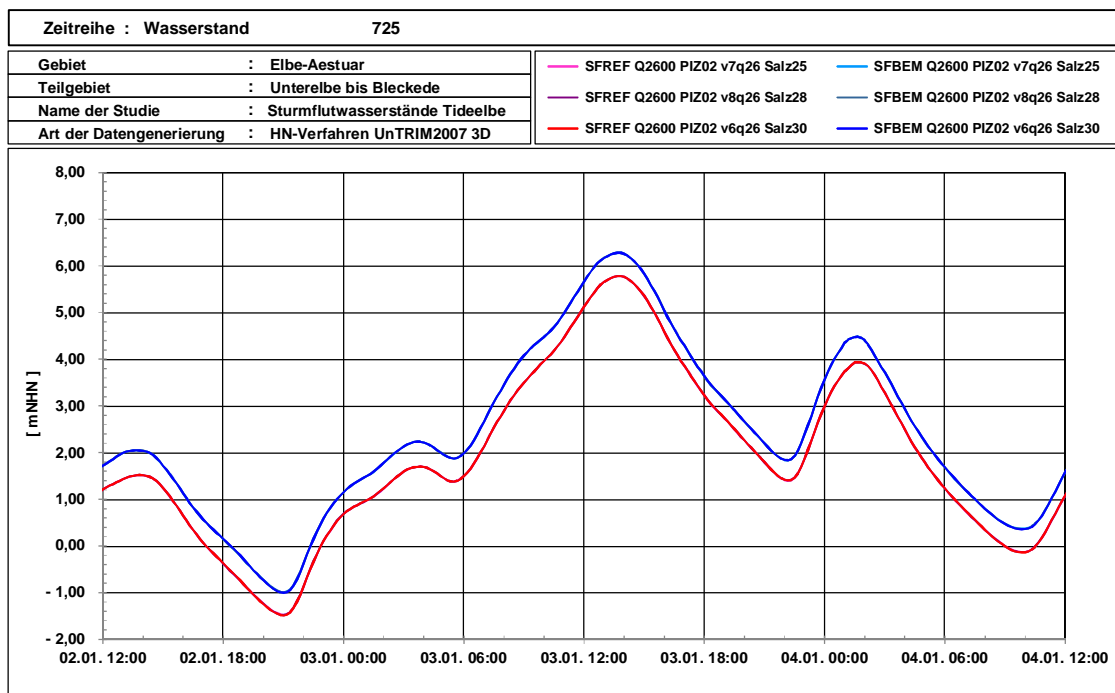


Bild 37: SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 725 (Cuxhaven) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 (rot), SFREFQ2600S28 (violett), SFREFQ2600S25 (pink), SFBEMQ2600 (blau), SFBEMQ2600S28 (blaugrau) und SFBEMQ2600S25 (hellblau).

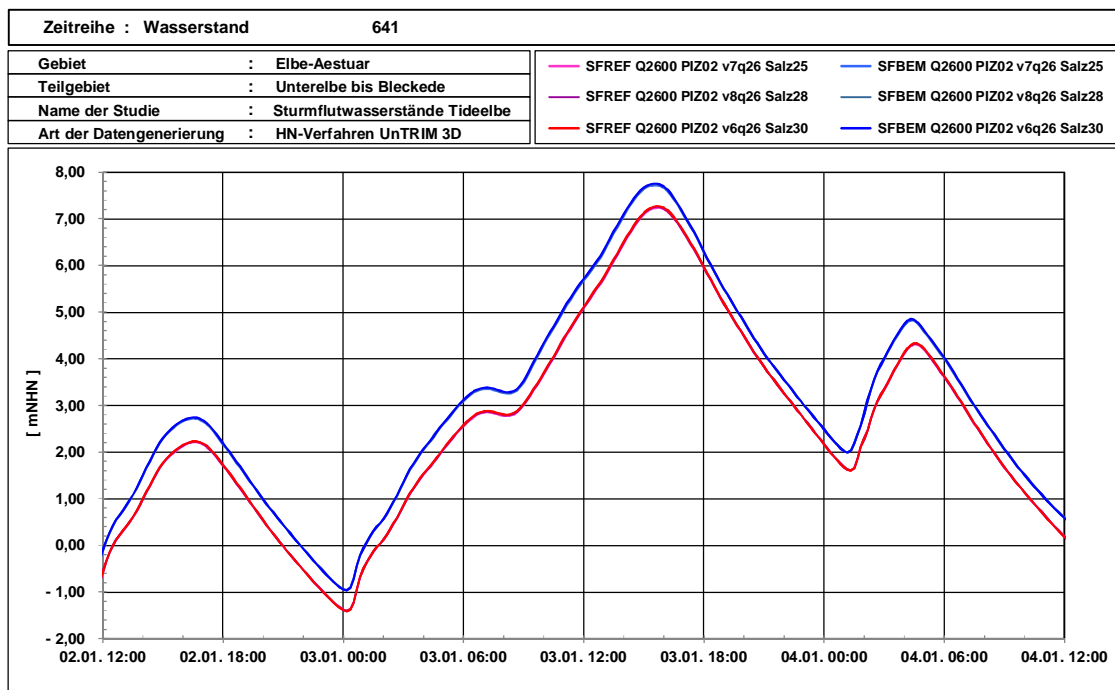


Bild 38: SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 641 (Schulau) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 (rot), SFREFQ2600S28 (violett), SFREFQ2600S25 (pink), SFBEMQ2600 (blau), SFBEMQ2600S28 (blaugrau) und SFBEMQ2600S25 (hellblau).

Bild 39 zeigt die für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600, SFREFQ2600S28, SFREFQ2600S25, SFBEMQ2600, SFBEMQ2600S28 und SFBEMQ2600S25 berechneten Sturmflutscheitelwasserstände. Für die Sturmflutscheitelwasserstände ergeben sich lediglich kleine Unterschiede aufgrund des gewählten Salzszenarios. Es zeigt sich, dass zwischen Glückstadt und Geesthacht die Sturmflutscheitelwasserstände im Sturmflutszenario SFREFQ2600S28 bzw. SFBEMQ2600S28 um 1 cm niedriger und im Sturmflutszenario SFREFQ2600S25 bzw. SFBEMQ2600S25 um 3 cm niedriger als im Sturmflutszenario SFREFQ2600 bzw. SFBEMQ2600 liegen.

Die Auswahl des den Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 zugrundeliegenden Salzszenarios beeinflusst die Sturmflutscheitelwasserstände stromauf von Brunsbüttel. Für die hier untersuchten Salzszenarios findet man für den Bereich stromauf von Glückstadt eine Reduktion des Sturmflutscheitelwasserstandes um 1 cm bis 3 cm.

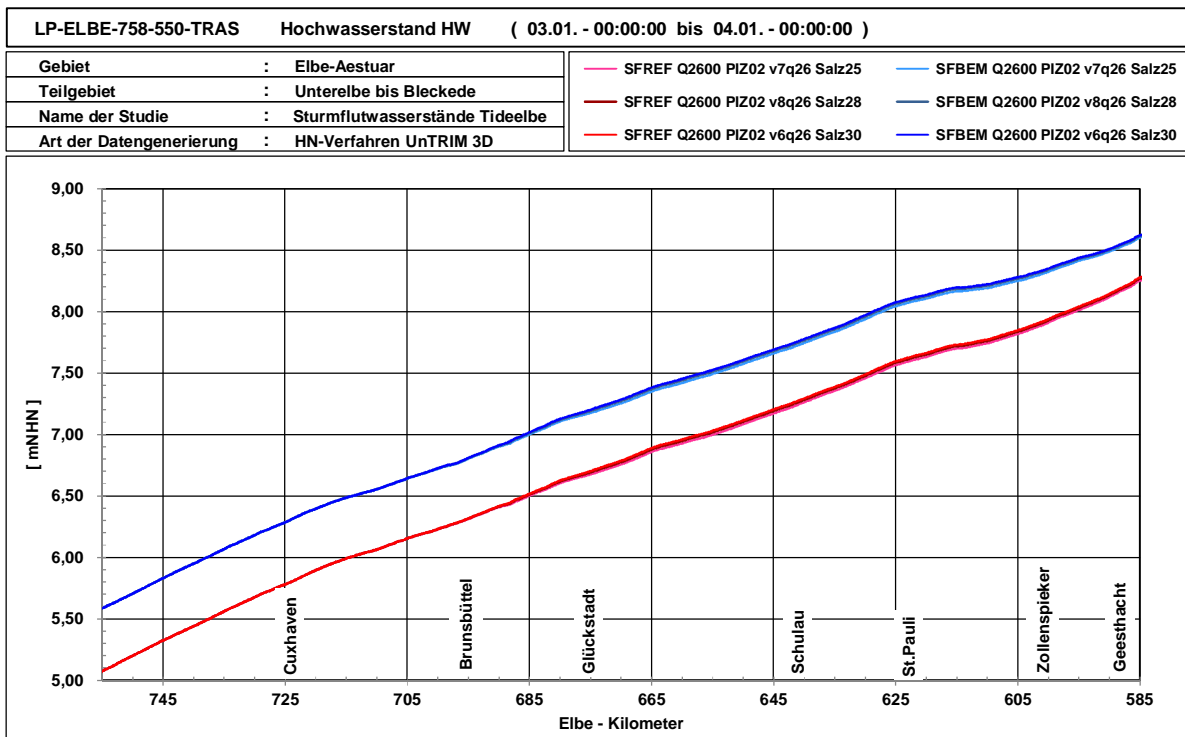


Bild 39: SFREF und SFBEM: Sturmflutscheitelwasserstand (HW) entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 755 (Elbmündung bei Bake Z) bis Elbe – km 585 (Geesthacht) für die Sturmflutszenarios SFREFQ2600 (rot), SFREFQ2600S28 (violett), SFREFQ2600S25 (pink), SFBEMQ2600 (blau), SFBEMQ2600S28 (blaugrau) und SFBEMQ2600S25 (hellblau).

8.3 Sensitivitätsstudie Wind über dem Elbeästuar

Sturmfluten sind definiert als durch starken Wind verursachtes Ansteigen des Wassers an der Meeresküste und in den Flussmündungen der Küstengebiet (DIN 4049-3). Die in diesem Gutachten betrachteten Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 wurden aus verschiedenen (nicht gleichzeitig aufgetretenen) Komponenten zusammengefügt (siehe Abschnitt 3). Der Windverlauf soll der Windentwicklung während der Sturmflut vom 3. Januar 1976 entsprechen.

Vom DWD wurden auf der Grundlage von Messungen der Windgeschwindigkeit mit dem Windmodell MKW (Massenkonsistentes Windfeld, Schmidt und Pätsch, 1992) hoch aufgelöste Windfelder über der Elbe erzeugt. Für die Orte Scharhörn und Hamburg St. Pauli ist der Vergleich zwischen gemessener und modellierter Windgeschwindigkeit in Bild 40 dargestellt. Man erkennt, dass Messung und Modell um ca. $\pm 5\%$ voneinander abweichen. Um den Einfluss einer Veränderung der Windgeschwindigkeit zu untersuchen, wird eine systematische Veränderung der mit MKW berechneten Windgeschwindigkeitsfelder um $\pm 5\%$ durchgeführt. Die Windrichtung wird nicht modifiziert.

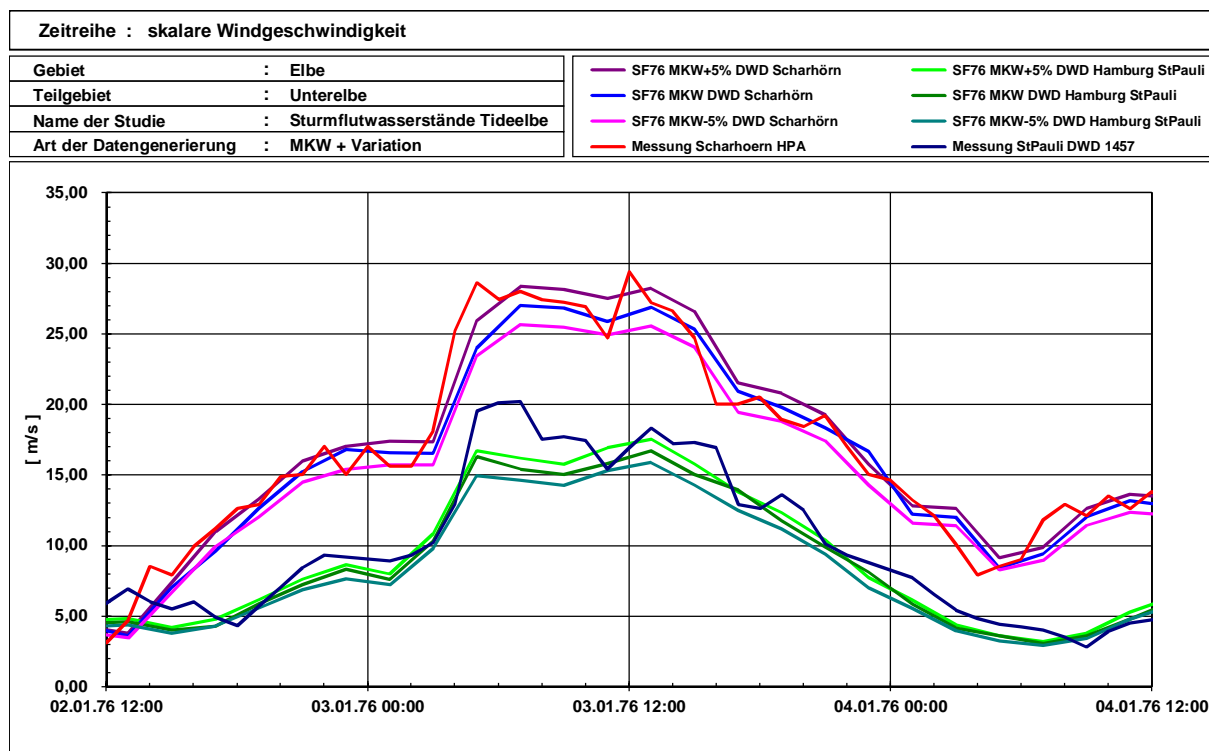


Bild 40: Wind: Zeitliche Entwicklung der Windgeschwindigkeit bei Scharhörn (Messung in Rot, MKW in Blau) und Hamburg St. Pauli (Messung in Dunkelblau, MKW in Dunkelgrün) während der Sturmflut 3. Januar 1976. Zusätzlich sind die für diese Orte um $\pm 5\%$ veränderten Windgeschwindigkeiten (MKW) eingezeichnet.

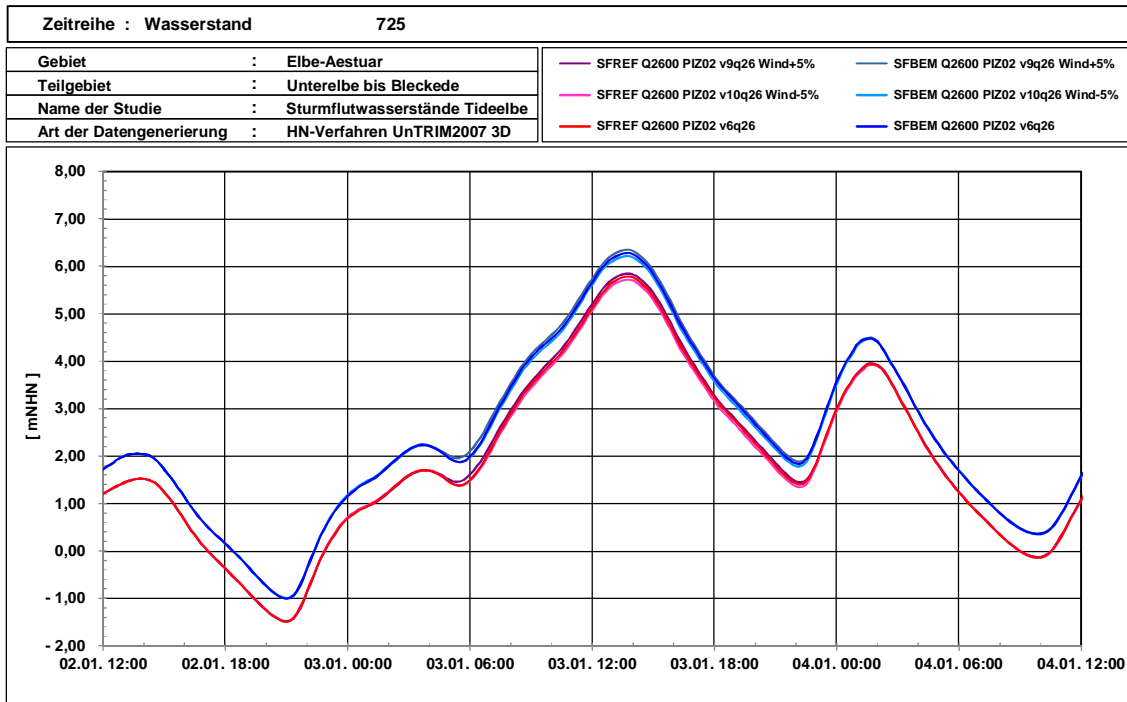


Bild 41: SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 725 (Cuxhaven) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 (rot), SFREFQ2600Wind+5% (violett), SFREFQ2600Wind-5% (pink), SFBEMQ2600 (blau), SFBEMQ2600Wind+5% (blau-grau) und SFBEMQ2600Wind-5% (hellblau).

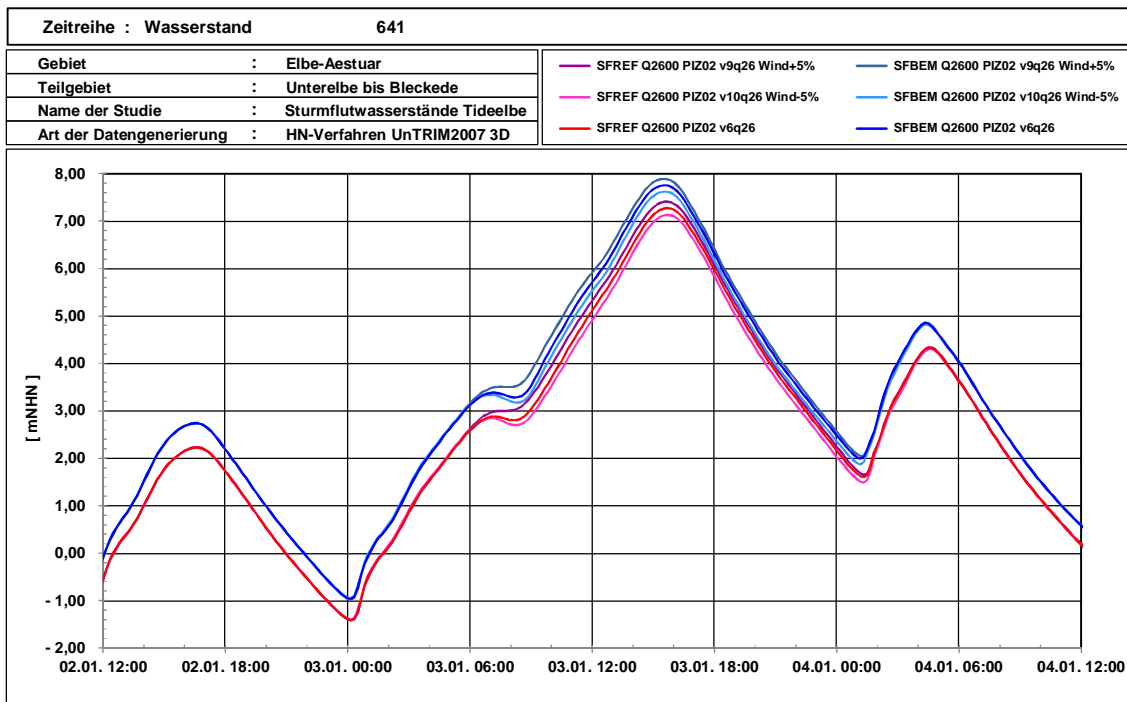


Bild 42: SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 641 (Schulau) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 (rot), SFREFQ2600Wind+5% (violett), SFREFQ2600Wind-5% (pink), SFBEMQ2600 (blau), SFBEMQ2600Wind+5% (blau-grau) und SFBEMQ2600Wind-5% (hellblau).

Die Wasserstandsentwicklung bei Elbe - km 725 (Cuxhaven) und Elbe - km 641 (Schulau) für die zwei beschriebenen Windszenarien sind in Bild 41 und Bild 42 dargestellt. Bei Cuxhaven erkennt man Unterschiede von ± 6 cm in den modellierten Wasserständen. Hier in der Elbmündung wird der Wasserstand hauptsächlich durch das Geschehen in der Nordsee und der Deutschen Bucht bestimmt. Weiter stromauf bei Schulau verändern sich die Wasserstände während der Sturmflut auf Grund des veränderten lokalen Windes. In diesem Bereich werden die Wasserstände stärker durch den lokal über dem Elbeästuar herrschenden Wind beeinflusst. Bei Schulau verändert sich der Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario SFREFQ2600 um ± 14 cm und für SFBEMQ2600 um ± 13 cm.

Bild 43 zeigt zusammenfassend die Sturmflutscheitelwasserstände entlang der Elbe für alle untersuchten Windszenarien. Eine Veränderung der lokalen Windgeschwindigkeit über der Elbe um ± 5 % verändert stromauf von Brunsbüttel die Sturmflutscheitelwasserstände um bis zu ± 15 cm.

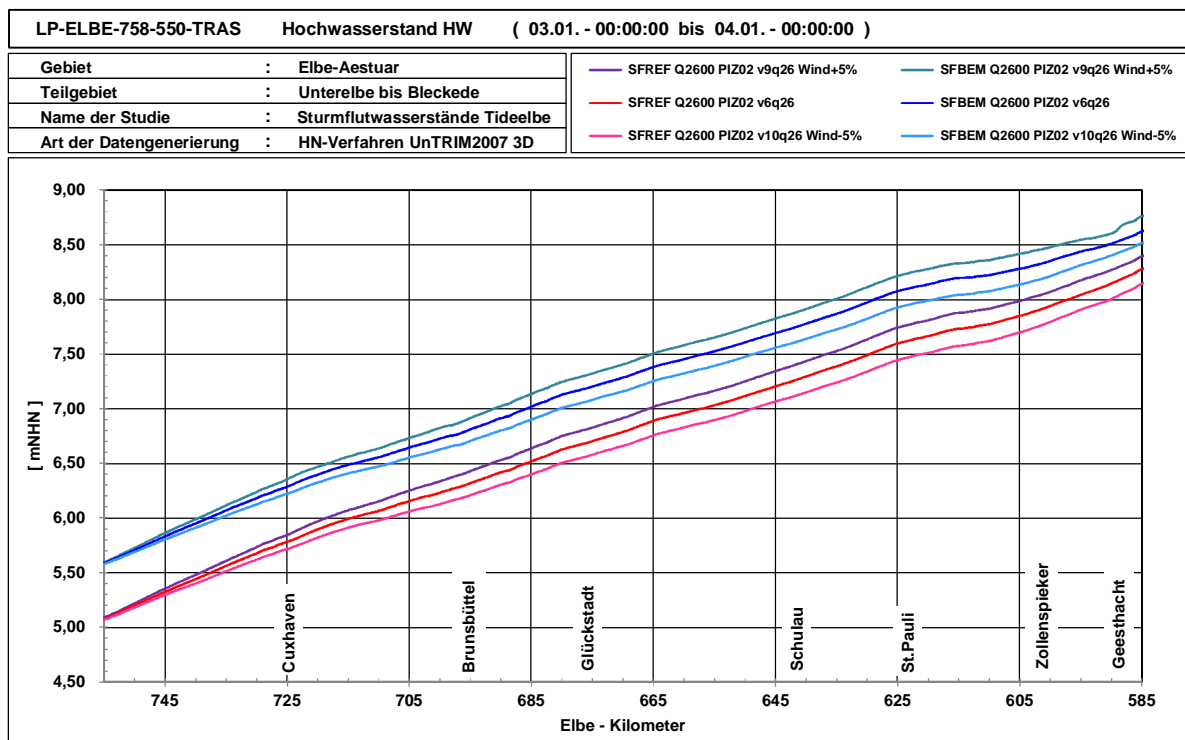


Bild 43: SFREF und SFBEM: Sturmflutscheitelwasserstand (HW) entlang des Elbefahrwassers von Elbe - km 755 (Elbmündung) bis Elbe - km 585 (Geesthacht) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 (rot), SFREFQ2600Wind+5% (violett), SFREFQ2600Wind-5% (pink), SFBEMQ2600 (blau), SFBEMQ2600Wind+5% (blaugrau) und SFBEMQ2600Wind-5% (hellblau).

Für die synthetischen Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 sind lediglich der Wasserstandsverlauf und der Windverlauf in Cuxhaven definiert. Verwendet man die beiden zusätzlich vorgestellten, im Rahmen der Messgenauigkeit liegenden, Windverläufe (siehe Wind $\pm 5\%$ in Bild 40) so lassen sich andere Wasserstandszeitreihen als Randwerte finden, die den gleichen Wasserstandsverlauf in Cuxhaven bewirken. Erhöht man den Wind über der Elbe um 5% , so müssen die Wasserstandsrandwerte auf dem Rand zur Nordsee (NoSeRand) um $1,2\%$ abgesenkt werden. Senkt man den Wind über der Elbe um 5% ab, so müssen die Wasserstandsrandwerte auf dem Rand zur Nordsee (NoSeRand) um $1,3\%$ angehoben werden. Bild 44 zeigt den Wasserstandsverlauf bei Cuxhaven, der für die drei beschriebenen Kombinationen von Wind- und Wasserstandsrandwerten annähernd gleich ist. In Cuxhaven wird jeweils ein Sturmflutscheitelwasserstand von $\text{NHN} + 5,78\text{ m}$ für SFREFQ2600 bzw. $\text{NHN} + 6,28\text{ m}$ für SFBEMQ2600 erreicht.

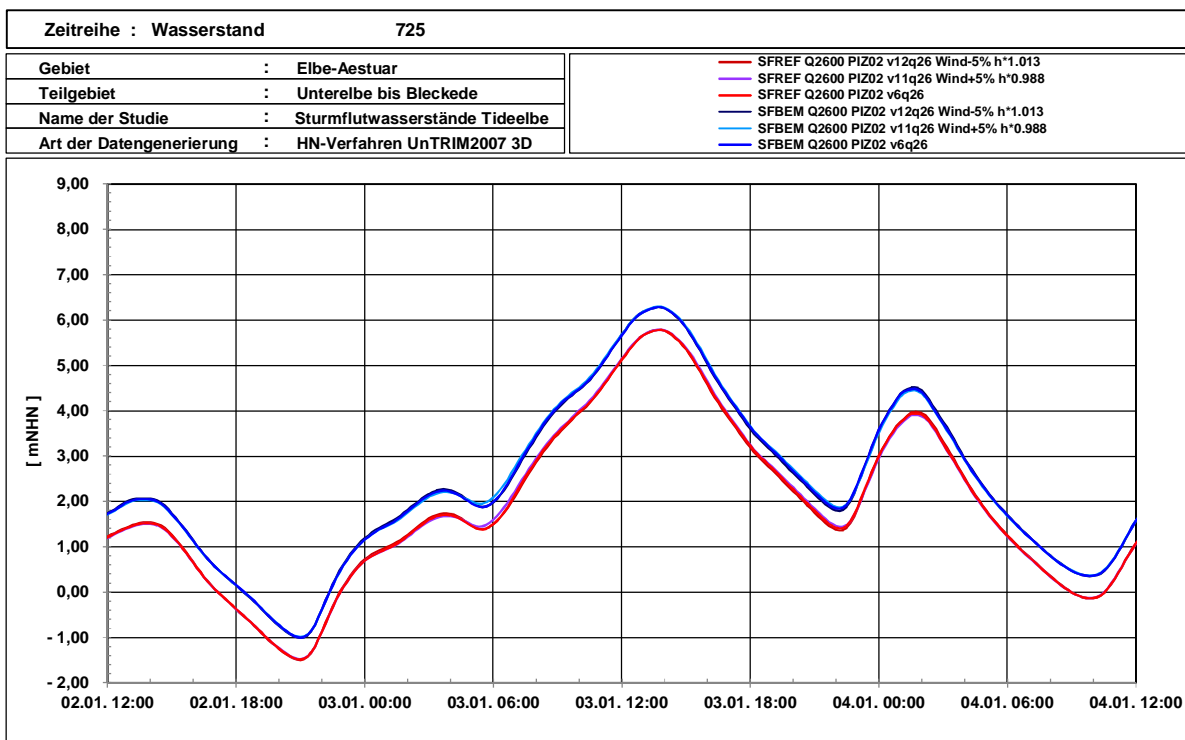


Bild 44: SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 725 (Cuxhaven) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 (rot), SFREFQ2600 mit Wind + 5% und NoSeRand- $1,2\%$ (violett), SFREFQ2600 mit Wind - 5% und NoSeRand+ $1,3\%$ (rotbraun), SFBEMQ2600 (blau), SFBEMQ2600 mit Wind + 5% und NoSeRand- $1,2\%$ (hellblau) und SFBEMQ2600 mit Wind - 5% und NoSeRand + $1,3\%$ (dunkelblau).

Stromauf von Cuxhaven ergeben sich auf Grund der unterschiedlichen Kombination der Randwerte Wind und Wasserstand unterschiedliche Wasserstände für die hier untersuchten Sturmflutszenarien. Bild 45 zeigt beispielhaft die Wasserstandsentwicklung bei Hamburg St. Pauli. Die veränderte Wahl der Randwerte bewirkt eine Veränderung der Sturmflutscheitelwasserstände in Hamburg St. Pauli um $\pm 8\text{ cm}$.

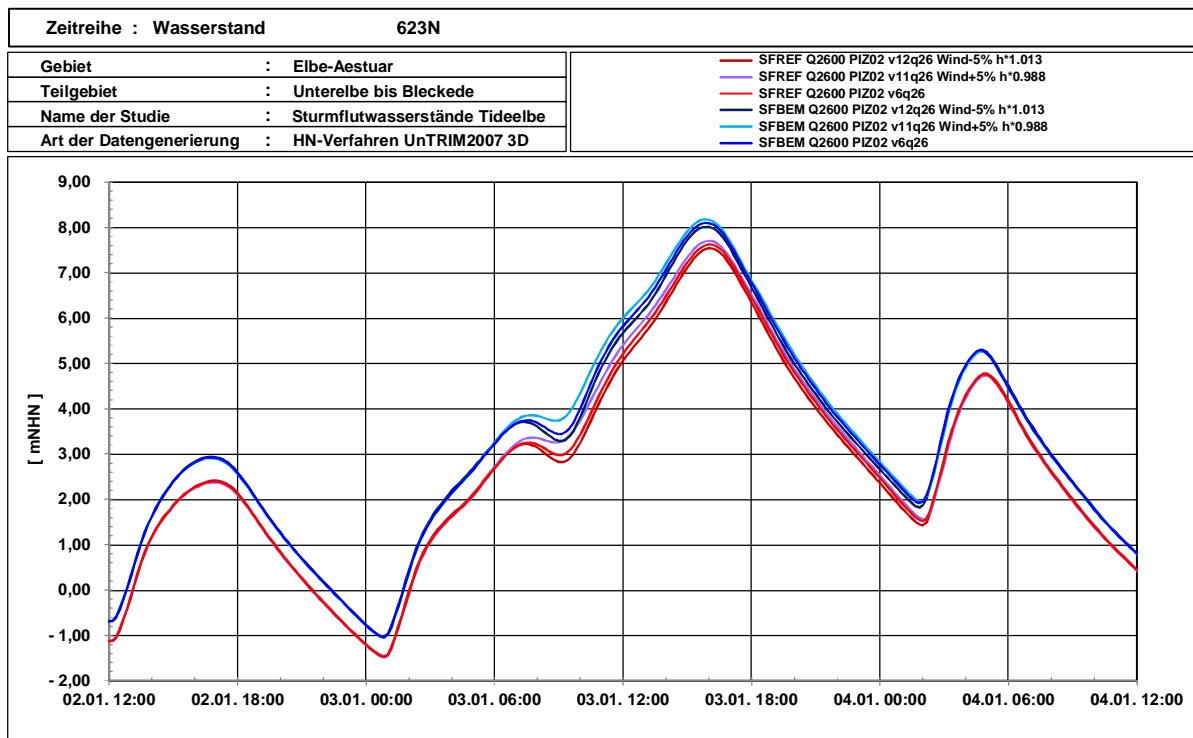


Bild 45: SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 623N (Hamburg St. Pauli) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 (rot), SFREFQ2600 mit Wind + 5 % und NoSeRand-1,2 % (violett), SFREFQ2600 mit Wind – 5 % und NoSeRand+1,3 % (rotbraun), SFBEMQ2600 (blau), SFBEMQ2600 mit Wind + 5 % und NoSeRand-1,2 % (hellblau) und SFBEMQ2600 mit Wind – 5 % und NoSeRand+1,3 % (dunkelblau).

Bild 46 zeigt den Einfluss der veränderten Randwerte Wind über der Elbe und Wasserstand am Rand zur Nordsee auf die Sturmflutscheitelwasserstände entlang der Elbe zwischen der Elbmündung (Elbe - km 755) und Geesthacht (Elbe - km 585). Im Bereich von Cuxhaven werden für drei unterschiedliche Kombinationen von Wind- und Wasserstandsrandwerten die gleichen Sturmflutscheitelwasserstände erreicht. Stromauf von Brunsbüttel unterscheiden sich die Sturmflutscheitelwasserstände um ± 10 cm.

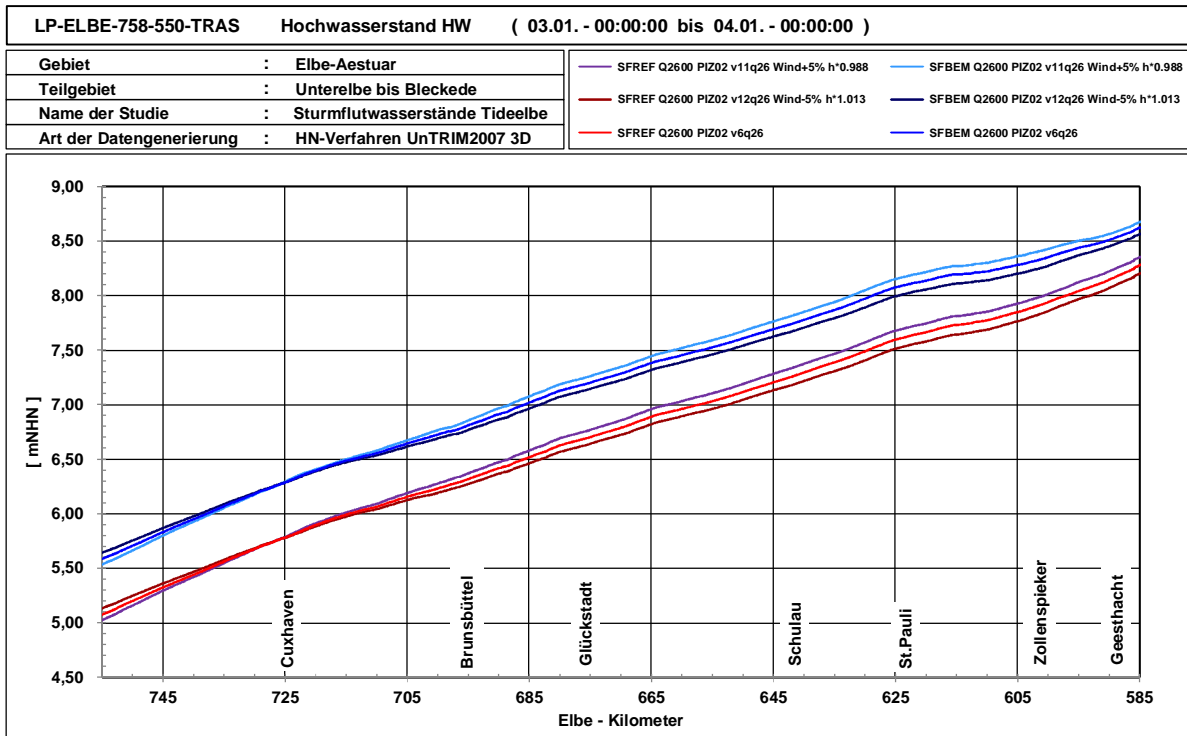


Bild 46: SFREF und SFBEM: Sturmflutspitzenwasserstand (HW) entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 755 (Elbmündung) bis Elbe – km 585 (Geesthacht) für die Sturmflut-szenarien SFREFQ2600 (rot), SFREFQ2600 mit Wind + 5 % und NoSeRand - 1,2 % (violett), SFREFQ2600 mit Wind - 5 % und NoSeRand + 1,3 % (rotbraun), SFBEMQ2600 (blau), SFBEMQ2600 mit Wind + 5 % und NoSeRand - 1,2 % (hellblau) und SFBEMQ2600 mit Wind - 5 % und NoSeRand + 1,3 % (dunkelblau).

8.4 Sturmflutszenario SF94 – Vergleich Messung und Modellergebnisse in der Mittelelbe

Bild 5 bis Bild 11 in Abschnitt 4.6 zeigen einen Vergleich zwischen den mit dem HN – Modell der Elbe berechneten (schwarz) und den gemessenen Wasserstandszeitreihen (rot) für den Zeitraum 27. Januar 1994 00:00 Uhr bis 29. Januar 1994 12:00 Uhr an den stromab des Wehres Geesthacht gelegenen Pegeln Bake A, Cuxhaven, Büsum, Brunsbüttel, Glückstadt, Hamburg St. Pauli und Bunthaus. Bild 47 bis Bild 51 zeigen ergänzend einen Vergleich zwischen den mit dem HN – Modell der Elbe berechneten (schwarz) und den gemessenen Wasserstandszeitreihen (rot) für den Zeitraum 27. Januar 1994 00:00 Uhr bis 29. Januar 1994 12:00 Uhr an den stromauf des Wehres Geesthacht gelegenen Pegeln Geesthacht, Artlenburg, Hohnstorf, Boizenburg und Bleckede. Die Lage dieser Pegel ist in Bild 32 markiert. Man erkennt stromauf von Artlenburg eine gute Übereinstimmung der gemessenen mit den modellierten Wasserstandszeitreihen am Tag vor der Sturmflut (27. Januar 1994) bei einem Abfluss Neu Darchau von 1350 m³/s. Die modellierten höchsten Wasserstände am 28. Januar 1994 weichen an den fünf gezeigten Pegeln um bis zu 20 cm von den gemessenen Scheitelwasserständen ab.

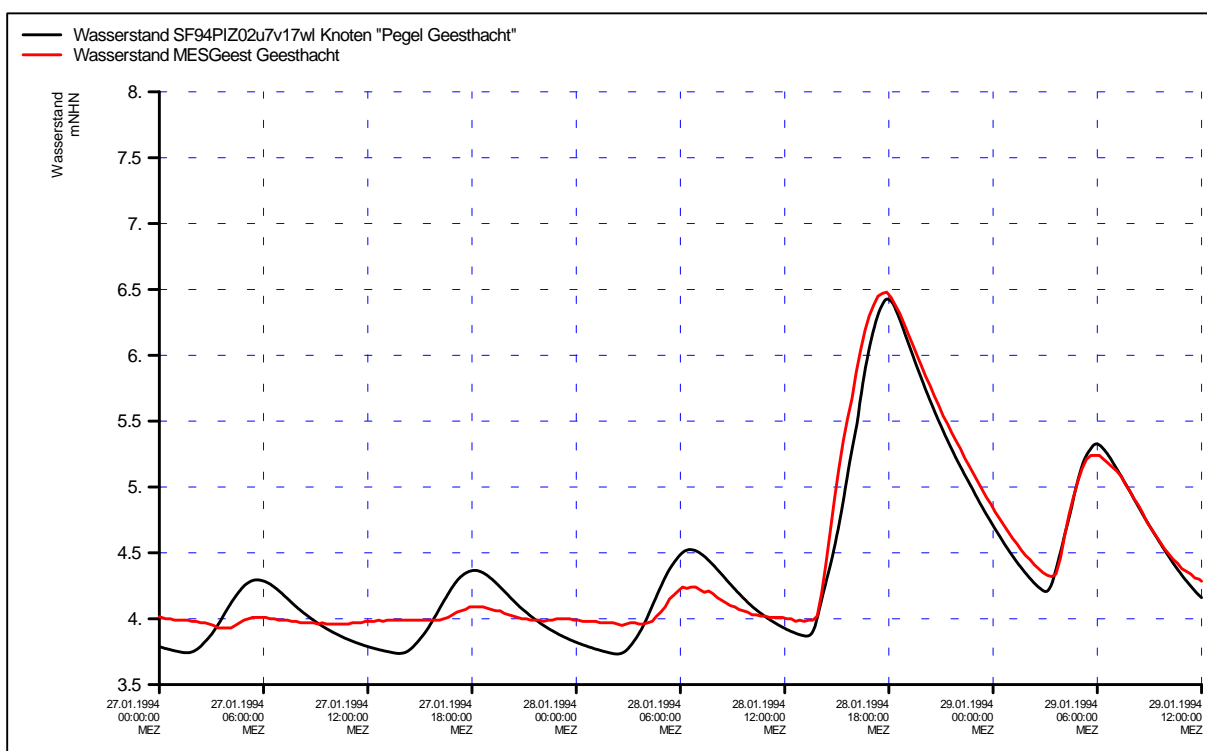


Bild 47: SF94: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Geesthacht (Elbe – km 583). Die Messung ist rot und die Modellrechnung schwarz gekennzeichnet.

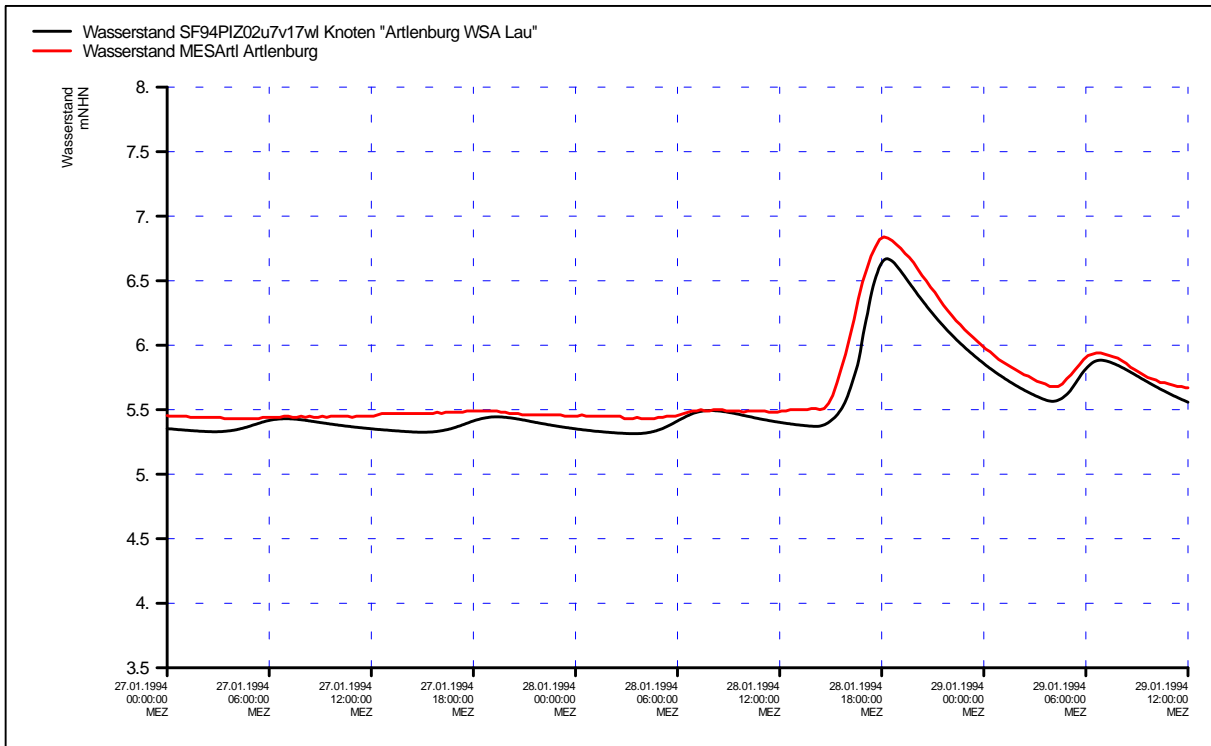


Bild 48: SF94: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Artlenburg (Elbe – km 574). Die Messung ist rot und die Modellrechnung schwarz gekennzeichnet.

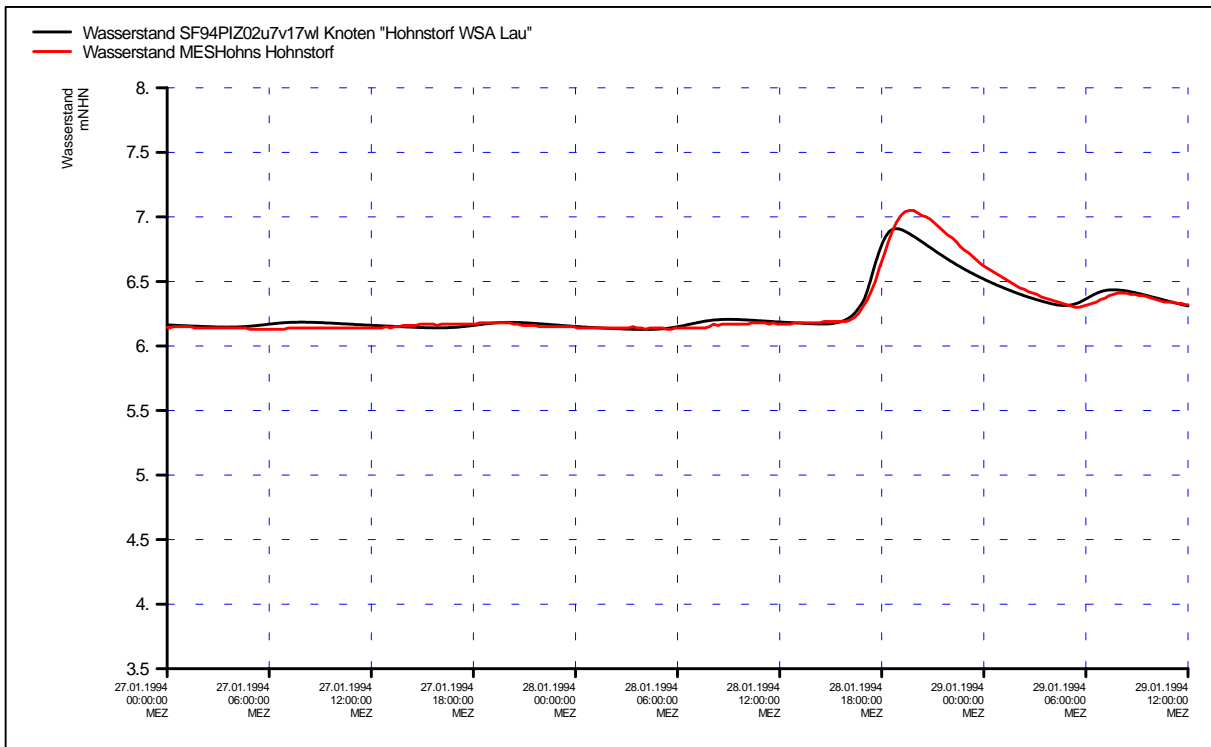


Bild 49: SF94: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Hohnstorf (Elbe- km 569). Die Messung ist rot und die Modellrechnung schwarz gekennzeichnet.

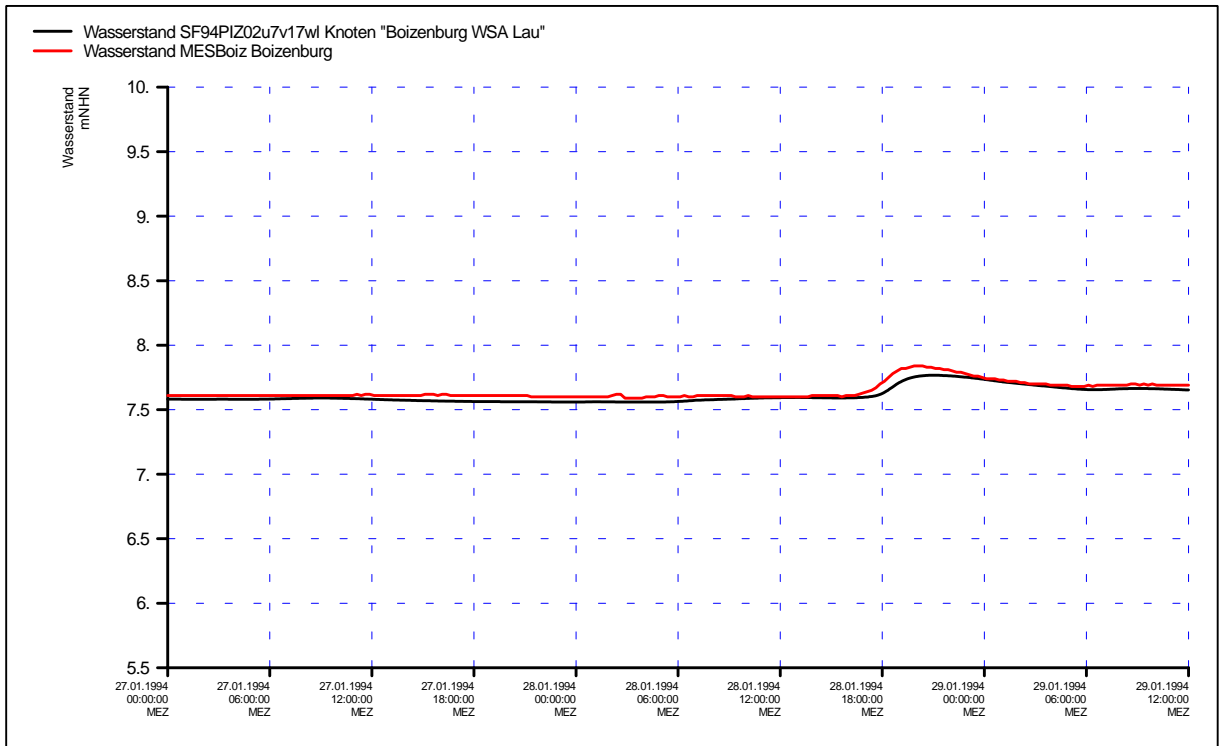


Bild 50: SF94: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Boizenburg (Elbe – km 559). Die Messung ist rot und die Modellrechnung schwarz gekennzeichnet.

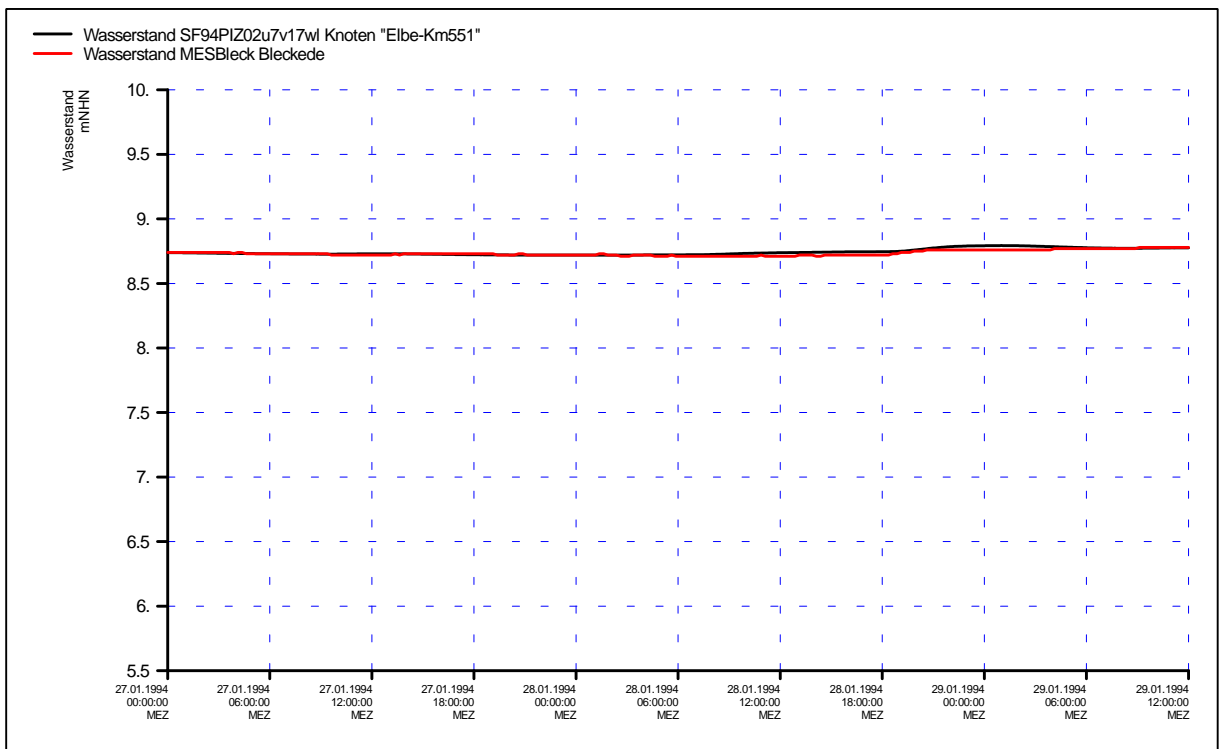


Bild 51: SF94: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Bleckede (Elbe – km 551). Die Messung ist rot und die Modellrechnung schwarz gekennzeichnet.

8.5 Bedeutung des Abflusses für die Wasserstände in der Mittelelbe

Die Bedeutung des Abflusses der Elbe auf die Sturmflutscheitelwasserstände in der Tideelbe bis zum Wehr Geesthacht wird in Abschnitt 5.4 behandelt. Bei Sturmfluten wird dieses Wehr gelegt, so dass Sturmfluten auch stromaufwärts zu Wasserstandserhöhungen führen können. Nachfolgend wird der mögliche Einfluss des Abflusses der Elbe auf Sturmflutscheitelwasserstände für den Bereich Geesthacht bis Bleckede dargestellt.

Vom Auftraggeber wird an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass Sturmfluten und Flusshochwasser unabhängig voneinander auftreten. Sturmfluten werden durch auflandige Stürme in der südlichen Nordsee erzeugt, während Flusshochwasser in der Elbe infolge von Starkregenereignissen und/oder Schneeschmelze etwa 1000 km südöstlich davon, im Oberlauf der Elbe, entstehen. Bis diese Hochwasserwellen das Wehr bei Geesthacht erreichen, vergeht über eine Woche. Das heißt, ein gleichzeitiges Auftreten von schweren Sturmfluten und Flusshochwassern ist in der Realität praktisch ausgeschlossen. Rein rechnerisch würde die Eintrittswahrscheinlichkeit eines gemeinsamen Auftretens des Sturmflutszenarios SFREF mit einem Abflussereignis in Höhe von 3700 m³/s etwa einem 6000-jährlichem Ereignis entsprechen. Aus diesem Grund können die in Bild 52 bis Bild 65 gestrichelt dargestellten kombinierten Scheitelwasserstände nicht als Grundlage für Hochwasserschutzplanungen herangezogen werden (MELUND-SH, 2018).

Um den Einfluss des Abflusses auf die Scheitelwasserstände des Sturmflutszenarios SF94 entlang der Tideelbe aber auch in der Mittelelbe bis Bleckede abzuschätzen, wird auch dieses Sturmflutszenario zusätzlich mit veränderten Abflüssen modelliert. Hierfür wird als Abfluss 2200 m³/s, 2600 m³/s, 2700 m³/s, 3200 m³/s und 3700 m³/s gewählt. Eine Einordnung der gewählten Abflüsse ermöglicht Tabelle 1.

Bild 52 zeigt die Sturmflutscheitelwasserstände für die betrachteten Abflussvarianten des Sturmflutszenarios SF94 entlang des Elbefahrtwassers zwischen der Elbmündung (Elbe – km 755) und Bleckede (Elbe – km 550). Im Mündungsbereich werden die Sturmflutscheitelwasserstände nur geringfügig durch den veränderten Abfluss beeinflusst. Im Bereich zwischen Brunsbüttel und Hamburg St. Pauli führt der veränderte Abfluss zu einer Erhöhung des Sturmflutscheitelwasserstandes um einige Zentimeter. Zwischen Hamburg und Geesthacht verändert sich der Sturmflutscheitelwasserstand bei den hier betrachteten Abflussvarianten um wenige Dezimeter. Stromauf von Geesthacht steigt der Scheitelwasserstand bei den betrachteten Abflussvarianten um mehrere Dezimeter (siehe auch Bild 53).

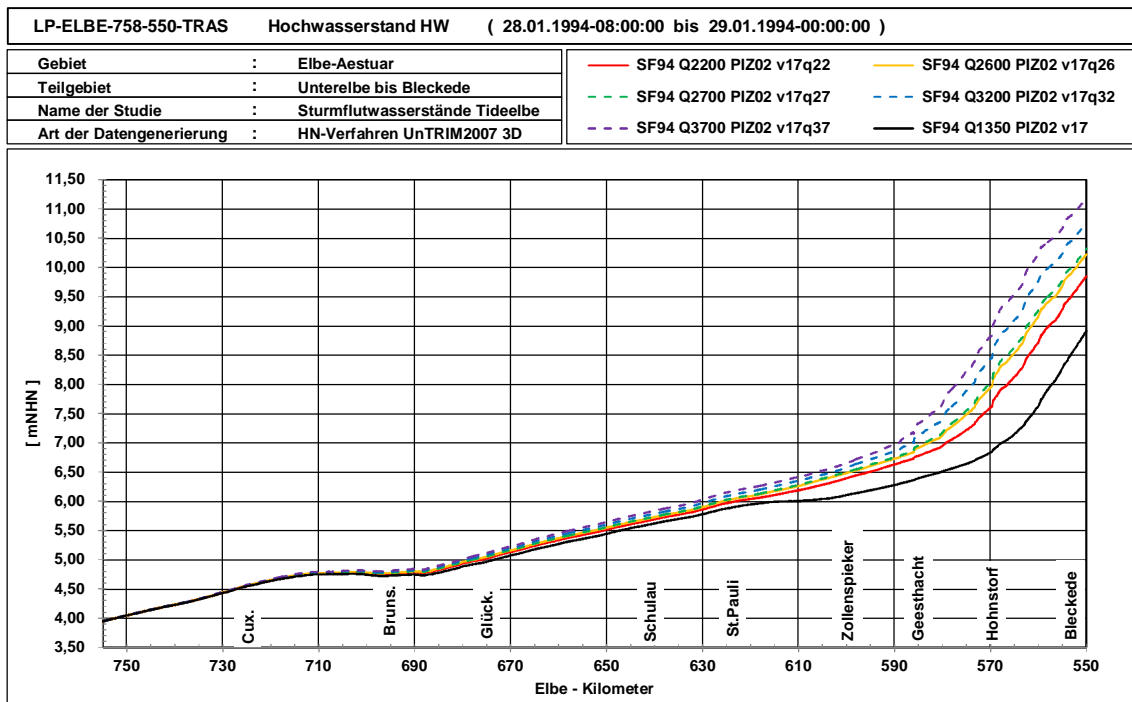


Bild 52: SF94: Sturmflutscheitelwasserstand HW entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 755 (Elbmündung bei Bake Z) bis Elbe – km 550 (Bleckede) für das Sturmflutszenario SF94 (schwarz) sowie die genannten Abflüsse 2200 m³/s, 2600 m³/s, 2700 m³/s, 3200 m³/s und 3700 m³/s (siehe auch Legende im Bild).

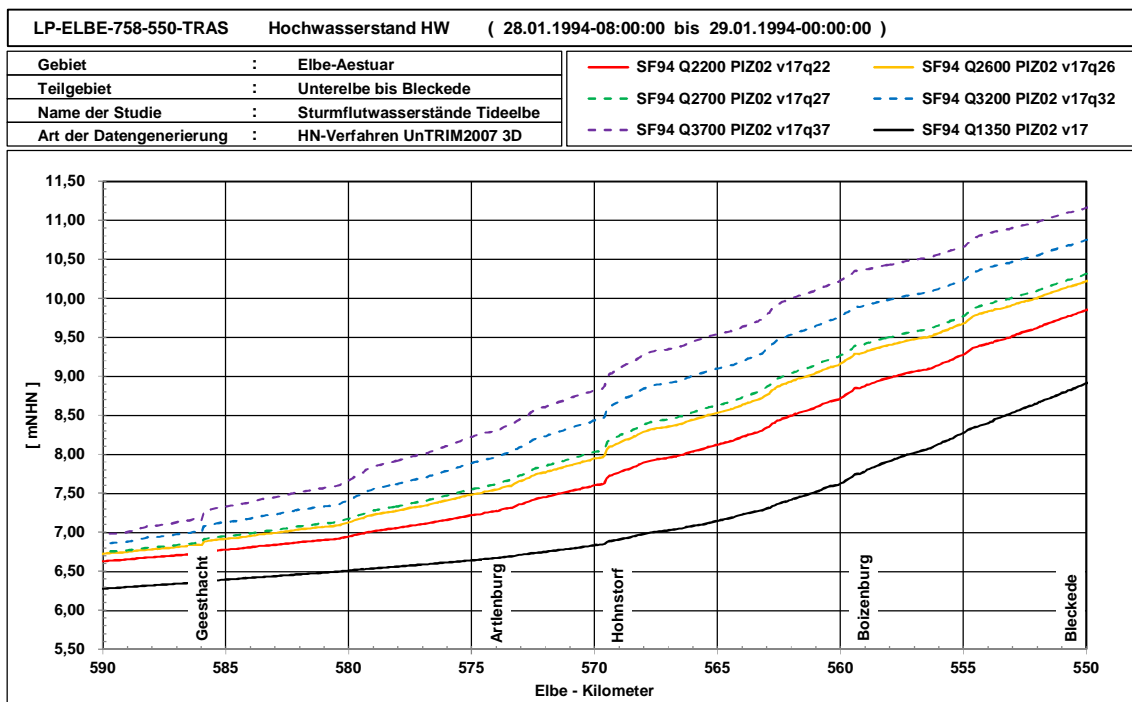


Bild 53: SF94: Ausschnitt aus Bild 52: Scheitelwasserstand HW entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 590 (Drennhaus) bis Elbe – km 550 (Bleckede) für das Sturmflutszenario SF94 (schwarz) sowie die genannten Abflüsse 2200 m³/s, 2600 m³/s, 2700 m³/s, 3200 m³/s und 3700 m³/s (siehe auch Legende im Bild).

Für fünf ausgewählte Orte entlang der Mittel- und Unterelbe sind die dieser Analyse zugrundeliegenden Wasserstandsverläufe für den Zeitraum 27. Januar 1994 00:00 Uhr bis 29. Januar 1994 12:00 Uhr in Bild 54 bis Bild 58 dargestellt. Bei Abflüssen höher als 1200 m³/s wird das Wehr Geesthacht gelegt, so dass die Tide bis in den Bereich der Mittel- und Unterelbe laufen kann, jedoch bei zunehmendem Abfluss mit immer geringerem Tidehub (siehe z. B. den Wasserstandsverlauf bei Geesthacht am 27. Januar 1994 in Bild 54). Bei Boizenburg, ca. 15 Kilometer stromauf von Geesthacht, ist bei einem Abfluss von 1350 m³/s kein Tidesignal mehr zu erkennen (siehe die schwarz gekennzeichnete Wasserstandszeitreihe in Bild 57).

Auch bei Sturmfluten wird das Wehr Geesthacht gelegt, so dass Sturmtiden ebenfalls in den Bereich der Mittel- und Unterelbe laufen. Bei zunehmendem Abfluss nimmt die durch die Sturmflut in der Tideelbe hervorgerufene Wasserstandserhöhung ab (siehe z. B. den Wasserstandsverlauf bei Geesthacht am 28. Januar 1994 in Bild 57). Auch mit zunehmender Entfernung zum Wehr Geesthacht nimmt die durch die Sturmflut verursachte Erhöhung der Wasserstände ab. So erkennt man bei Bleckede (Bild 58), ca. 30 Kilometer stromauf von Geesthacht, für die betrachteten Abflussvarianten eine durch die Sturmflut am 28. Januar 1994 verursachte Erhöhungen der Wasserstände von weniger als 15 cm.

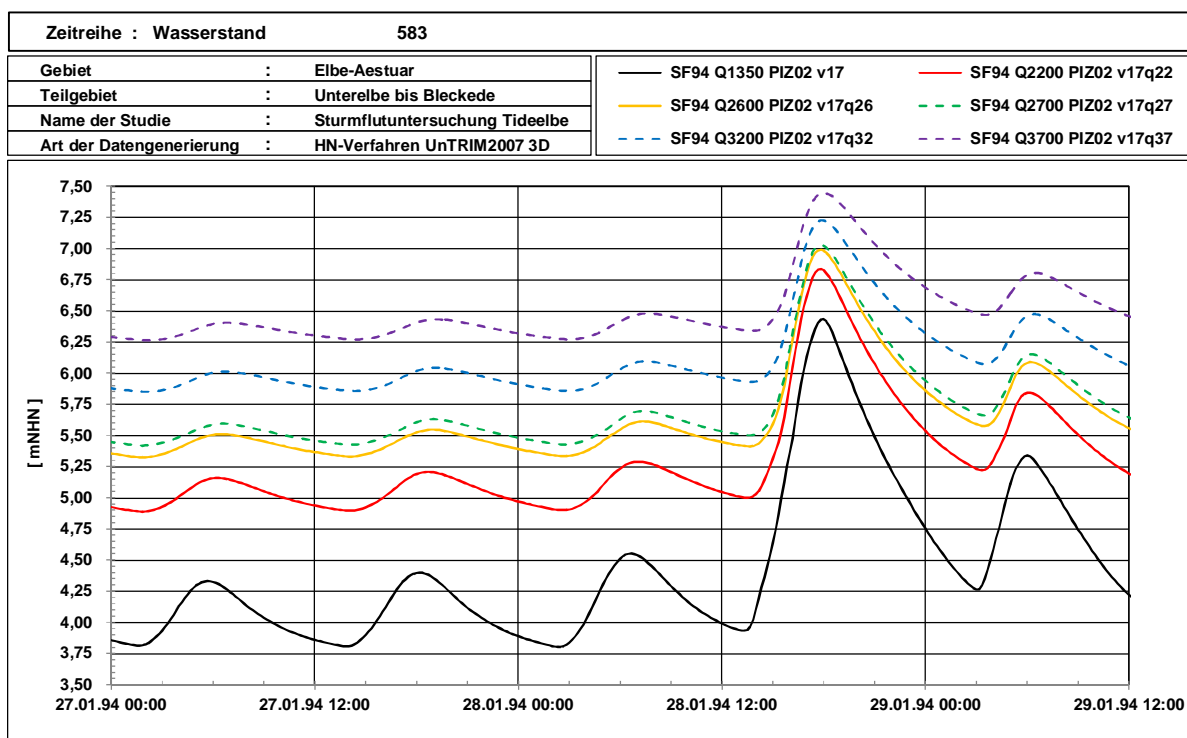


Bild 54: SF94: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 583 (Geesthacht) während der Sturmflut 28. Januar 1994 mit Abflussvarianten.

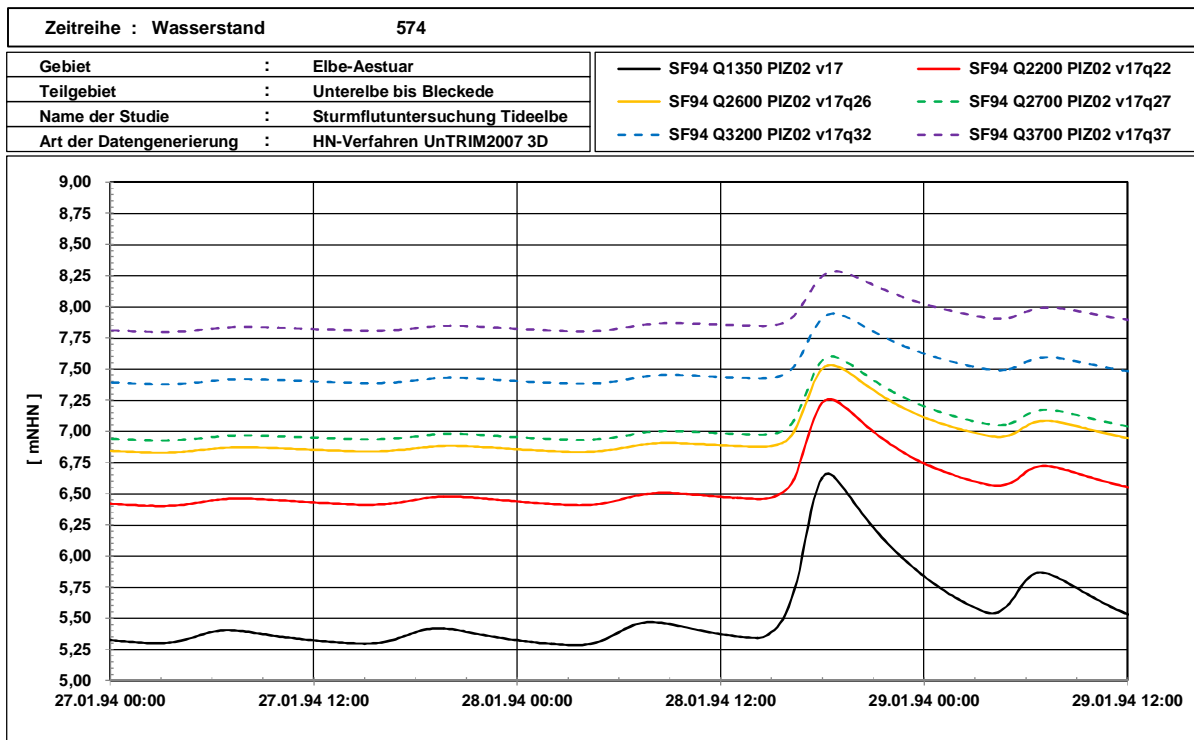


Bild 55: SF94: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 574 (Artlenburg) während der Sturmflut 28. Januar 1994 mit Abflussflussvarianten.

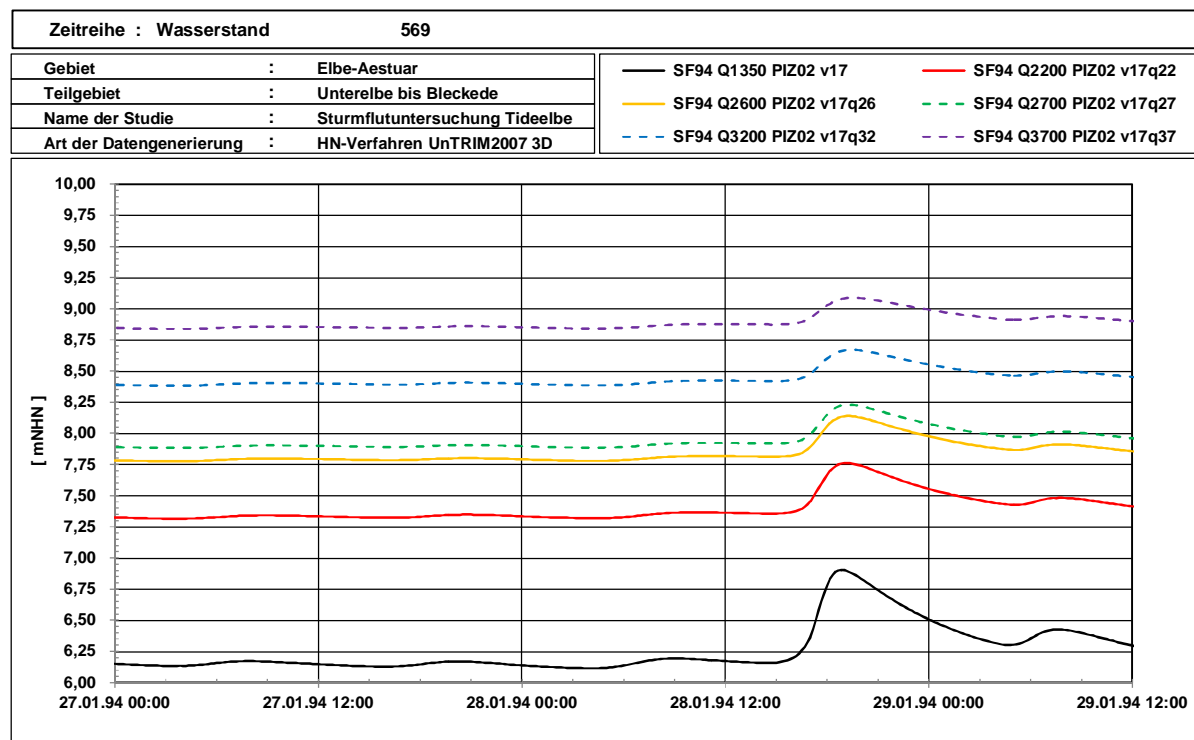


Bild 56: SF94: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 569 (Hohnstorf) während der Sturmflut 28. Januar 1994 mit Abflussvarianten.

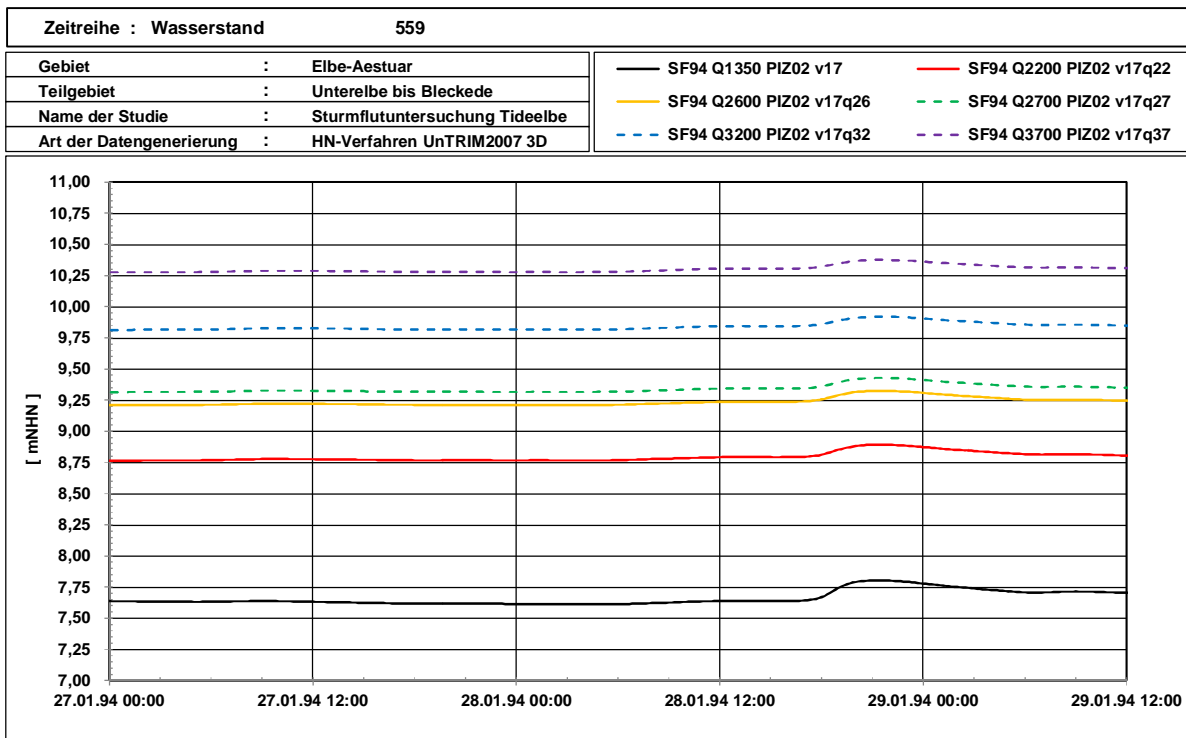


Bild 57: SF94: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 559 (Boizenburg) während der Sturmflut 28. Januar 1994 mit Abflussvarianten.

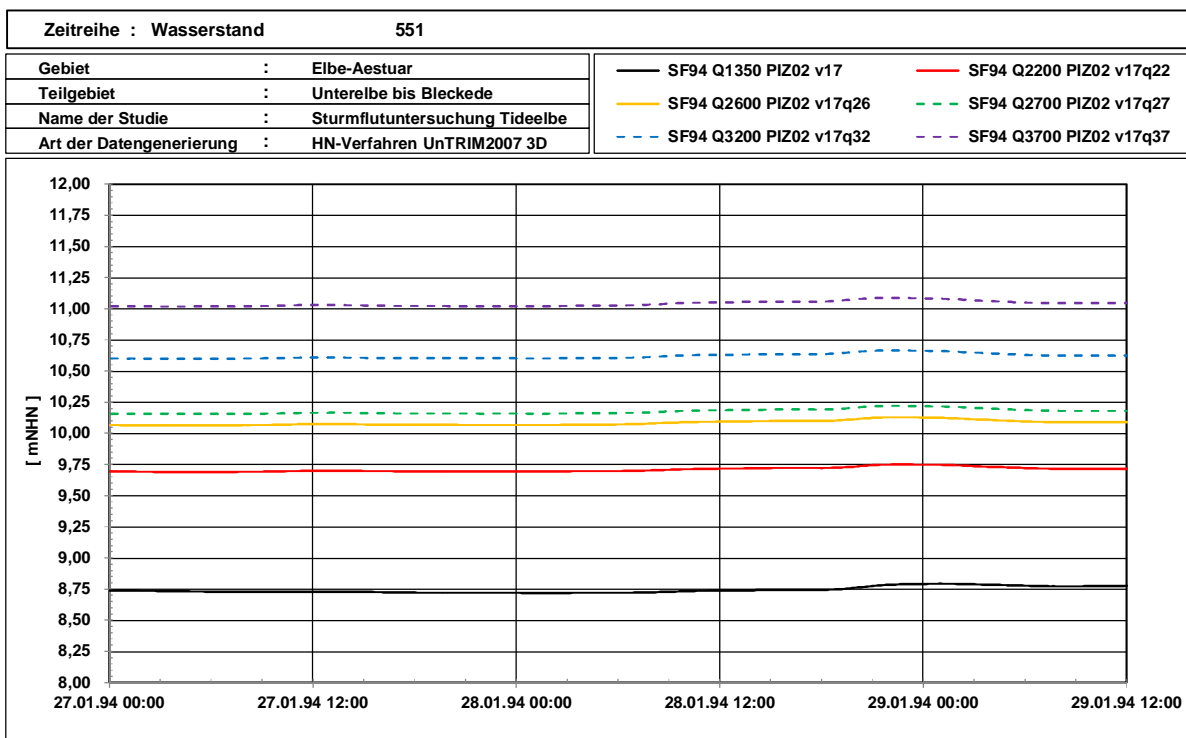


Bild 58: SF94: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 551 (Bleckede) während der Sturmflut 28. Januar 1994 mit Abflussvarianten.

Um den Einfluss des Abflusses auf die Scheitelwasserstände des Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEM2600 entlang der Tideelbe aber auch in der Mittelelbe bis Bleckede abzuschätzen, wird für diese Sturmflutszenarien die in Abschnitt 5.4 vorgestellte Sensitivitätsstudie zum Abfluss durchgeführt. Hierfür wird als Abfluss 2200 m³/s, 2600 m³/s, 2700 m³/s, 3200 m³/s und 3700 m³/s gewählt. Tabelle 1 ermöglicht eine Einordnung der gewählten Abflüsse.

Bild 59 zeigt, wie Bild 23, die Sturmflutscheitelwasserstände für die betrachteten Abflussvarianten der Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 jedoch entlang des Elbefahrwassers zwischen der Elbmündung (Elbe – km 755) und Bleckede (Elbe – km 550). Im Mündungsbereich werden die Sturmflutscheitelwasserstände nur geringfügig durch den veränderten Abfluss beeinflusst. Im Bereich zwischen Brunsbüttel und Hamburg St. Pauli führt der veränderte Abfluss zu einer Erhöhung des Sturmflutscheitelwasserstandes um einige Zentimeter. Zwischen Hamburg und Geesthacht verändert sich der Sturmflutscheitelwasserstand bei den hier betrachteten Abflussvarianten um wenige Dezimeter. Stromauf von Geesthacht steigt der Scheitelwasserstand bei den betrachteten Abflussvarianten um mehrere Dezimeter (siehe auch Bild 60).

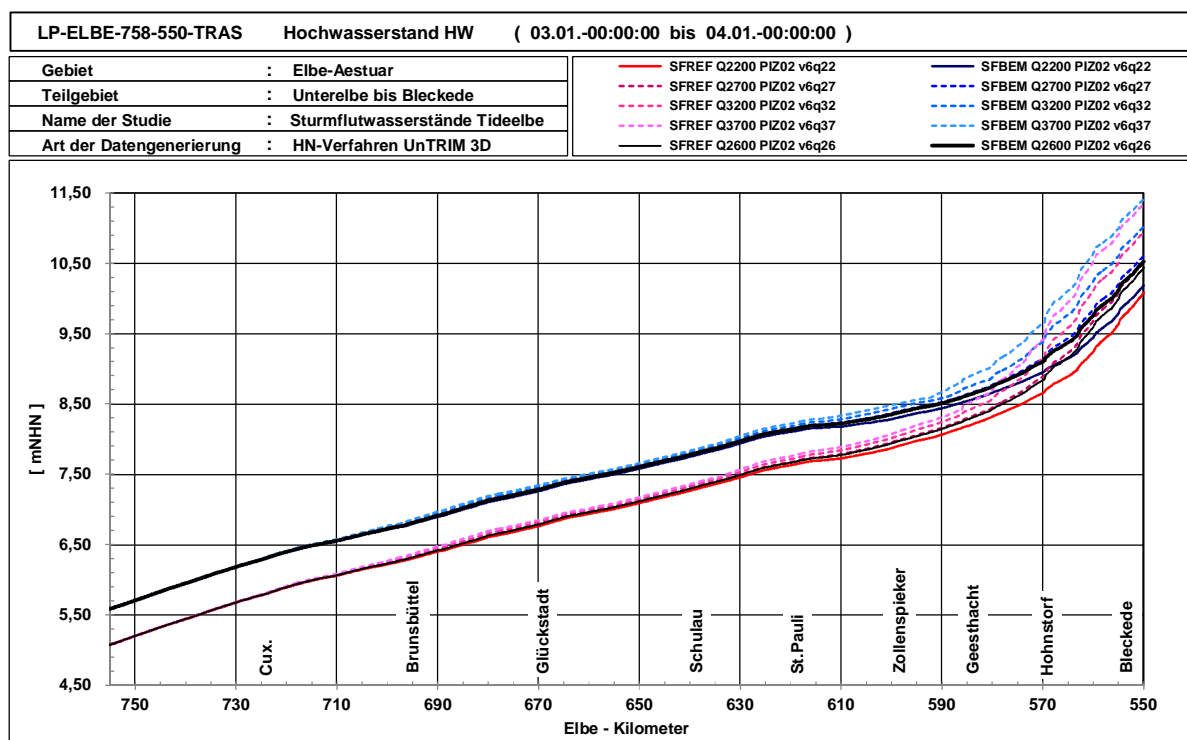


Bild 59: SFREF und SFBEM: Sturmflutscheitelwasserstand HW entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 755 (Elbmündung bei Bake Z) bis Elbe – km 550 (Bleckede) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 (schwarz) und SFBEMQ2600 (schwarz fett) sowie die genannten Abflüsse 2200 m³/s, 2700 m³/s, 3200 m³/s und 3700 m³/s (siehe auch Legende im Bild).

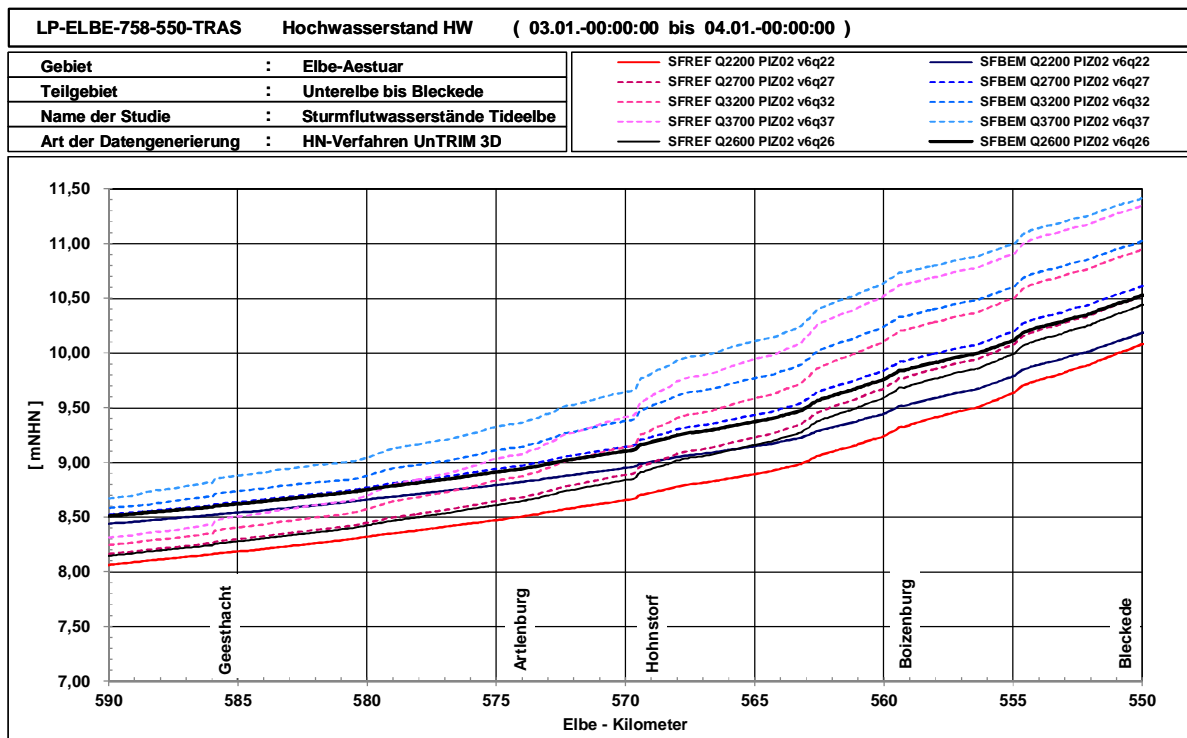


Bild 60: SFREF und SFBEM: Ausschnitt aus Bild 59, Scheitelwasserstand HW entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 590 (Drennhaus) bis Elbe – km 550 (Bleckede) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 (schwarz) und SFBEMQ2600 (schwarz fett) sowie die genannten Abflüsse 2200 m³/s, 2700 m³/s, 3200 m³/s und 3700 m³/s (siehe auch Legende im Bild).

Für fünf ausgewählte Orte entlang der Mittel- und Untereibe sind die dieser Analyse zugrundeliegenden Wasserstandsverläufe für den Zeitraum 2. Januar 12:00 Uhr bis 4. Januar 12:00 Uhr in Bild 61 bis Bild 65 dargestellt. Bei Abflüssen höher als 1200 m³/s wird das Wehr Geesthacht gelegt, so dass die Tide bis in den Bereich der Mittel- und Untereibe laufen kann, jedoch bei zunehmendem Abfluss mit immer geringerem Tidehub (siehe z. B. den Wasserstandsverlauf bei Geesthacht am 2. Januar in Bild 61). Bei Boizenburg, ca. 15 Kilometer stromauf von Geesthacht, ist bei einem Abfluss von 2200 m³/s kein Tidesignal mehr zu erkennen (siehe Bild 64). Der Wasserstand wird hier am Tag vor der Sturmflut lediglich durch die Höhe des Abflusses bestimmt (vergleiche hierzu auch die Wasserstände beim Sturmflutszenario SF94 in Bild 57).

Auch bei Sturmfluten wird das Wehr Geesthacht gelegt, so dass Sturmtiden ebenfalls in den Bereich der Mittel- und Untereibe laufen. Bei zunehmendem Abfluss nimmt die durch die Sturmflut in der Tideelbe hervorgerufene Wasserstandserhöhung ab (siehe z. B. den Wasserstandsverlauf bei Geesthacht am 3. Januar in Bild 61). Auch mit zunehmender Entfernung zum Wehr Geesthacht nimmt die durch die Sturmflut verursachte Erhöhung der Wasserstände ab. So erkennt man bei Bleckede (Bild 65), ca. 30 Kilometer stromauf von Geesthacht, für die betrachteten Abflussszenarien eine durch die Sturmflutszenarien am 3. Januar verursachte Erhöhungen der Wasserstände von weniger als 50 cm.

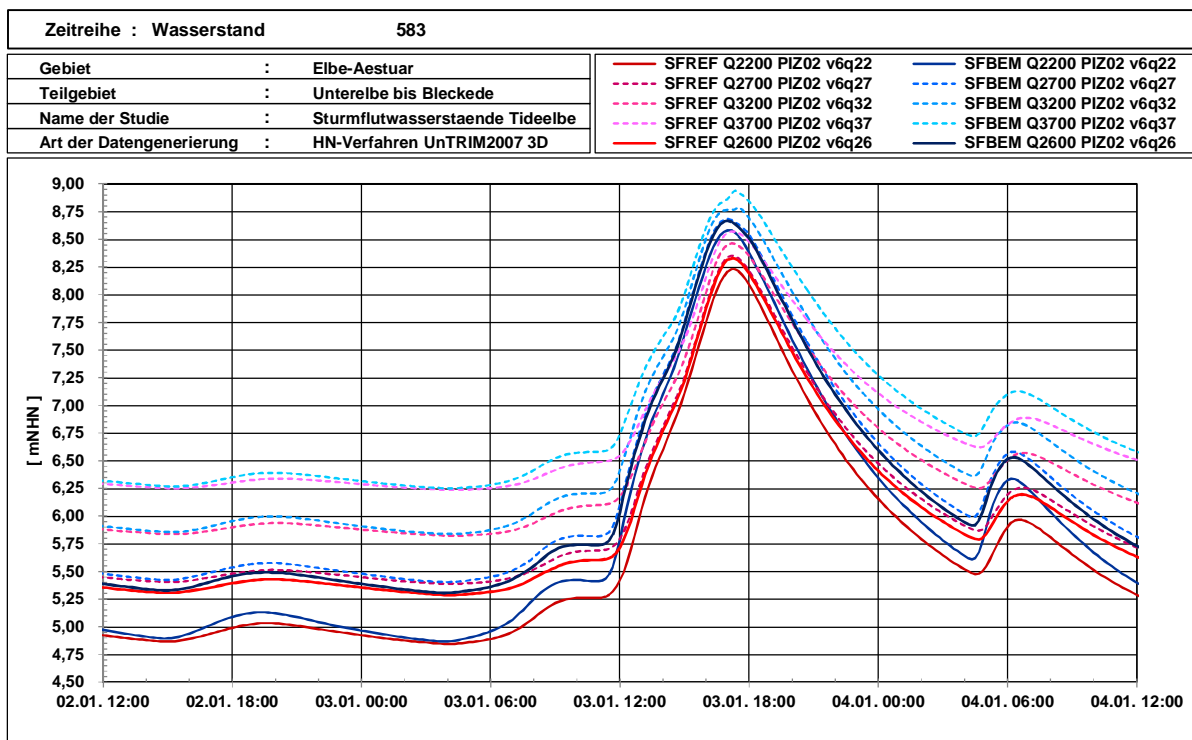


Bild 61: SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 583 (Geesthacht) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit Abflussvarianten.

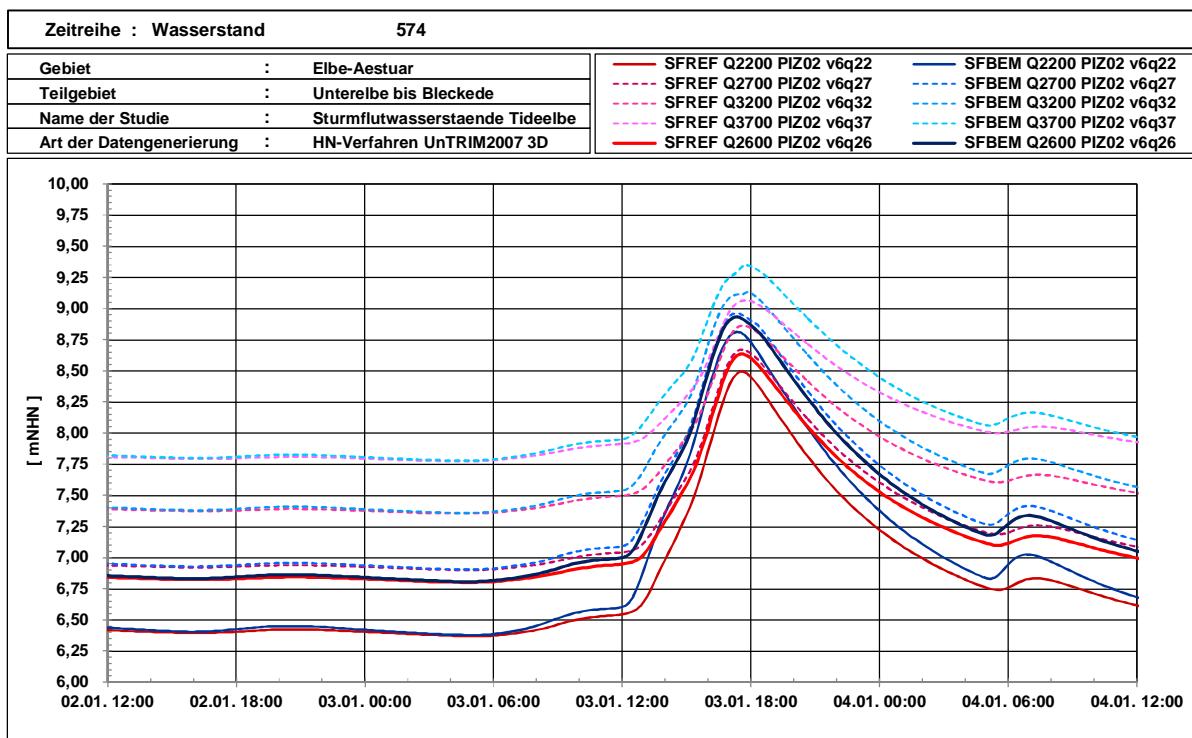


Bild 62: SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 574 (Artlenburg) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit Abflussvarianten.

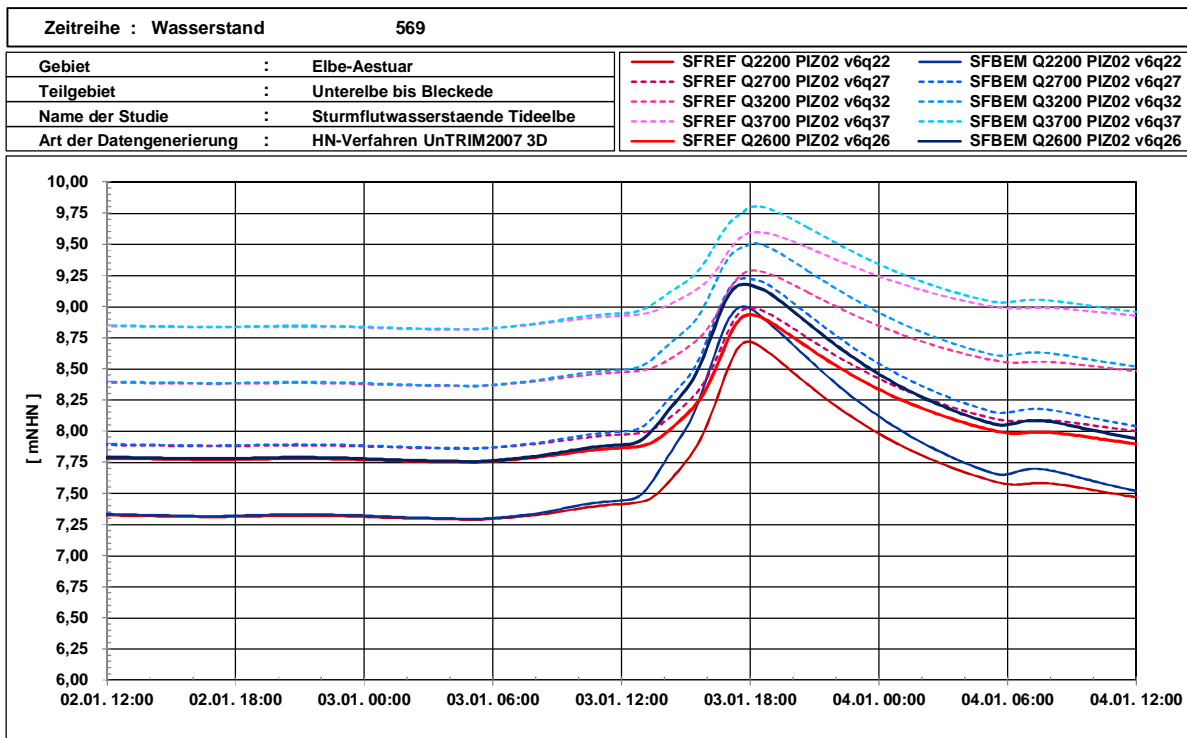


Bild 63: SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 569 (Hohnstorf) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit Abflussvarianten.

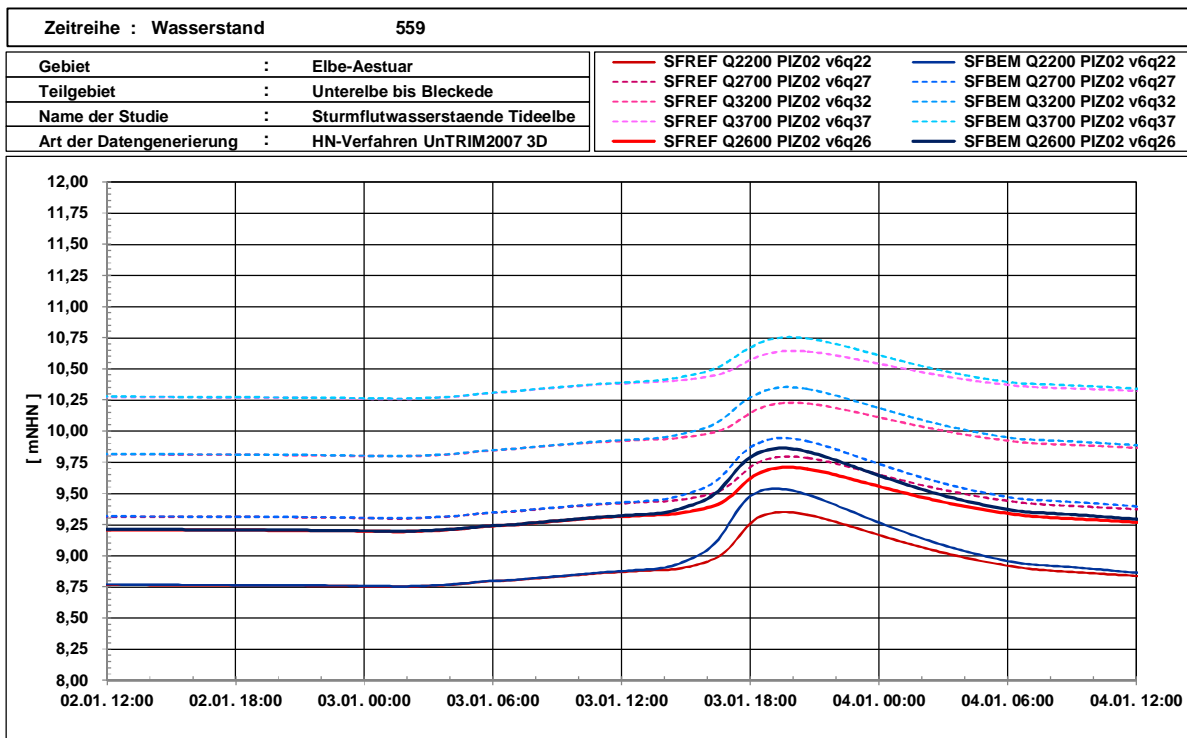


Bild 64: SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 559 (Boizenburg) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit Abflussvarianten.

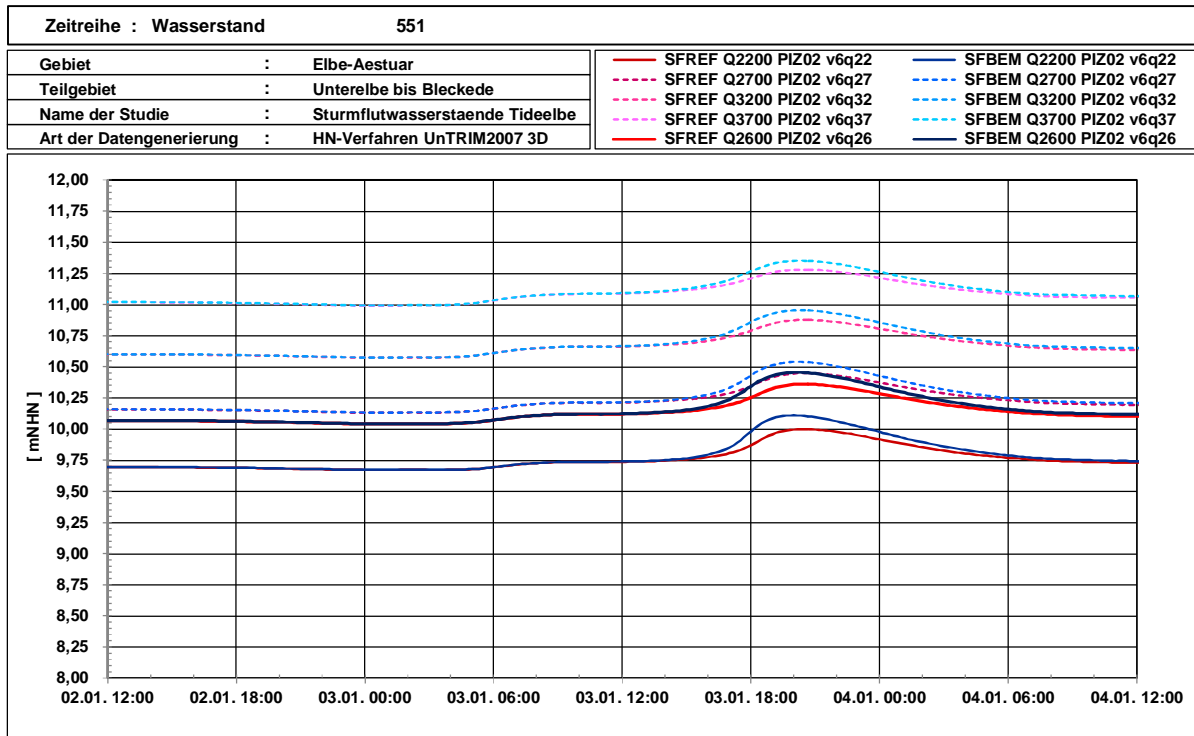


Bild 65: SFREF und SFBEM: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 551 (Bleckede) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit Abflussvarianten.

8.6 Sensitivitätsstudie Rauheitsverteilung in der Mittelelbe

Im Rahmen der in diesem Gutachten vorgestellten Untersuchungen werden Grundlagen für die Ermittlung von Wasserständen zur Bemessung von Deichen an der Tideelbe erarbeitet und vorgestellt. Da das verwendete HN-Modell des Elbeästuares das Gebiet von der Außenelbe über die Unterelbe bis in die Mittelelbe bis Bleckede umfasst (siehe Bild 2) können die höchsten im Untersuchungszeitraum aufgetretenen Wasserstände für das gesamte Modellgebiet dargestellt werden. In der Mittelelbe stromauf des Wehrs Geesthacht hängen die Wasserstände von der Höhe des Abflusses, vom durchströmten Querschnitt (z. B. Größe des Vorlandbereiches) sowie der Sohlreibung des Flussbettes und des Vorlandes (z. B. in Abhängigkeit vom jahreszeitlich unterschiedlichen Bewuchs) ab. Bei Sturmflut wird das Wehr Geesthacht gelegt, sodass zusätzlich das Sturmfluttidesignal aus der Tideelbe die Höhe des Wasserstandes beeinflusst.

Im folgenden Abschnitt wird die Bedeutung der Rauheitsverteilung in der Mittelelbe zwischen Geesthacht und Bleckede für die Sturmflutwasserstände in der Tideelbe und die Wasserstände in der Mittelelbe betrachtet. Dafür wird eine Sensitivitätsstudie zur Rauheitsverteilung durchgeführt. Es werden zwei zusätzliche Rauheitsverteilungen im Bereich der Mittelelbe verwendet, die den Wasserstand im Zeitraum vor der Sturmflut um ca. ± 10 cm verändern. Im Verhältnis zu der in Bild 33 gezeigten effektiven Sohlrauheit senkt die in Bild 66 dargestellte effektive Sohlrauheit den Wasserstand in der Mittelelbe, während die in Bild 67 dargestellte effektive Sohlrauheit den Wasserstand in der Mittelelbe anhebt. In der Tideelbe wird die Rauheitsverteilung nicht verändert. Hier wird die in Bild 31 dargestellt Verteilung verwendet.

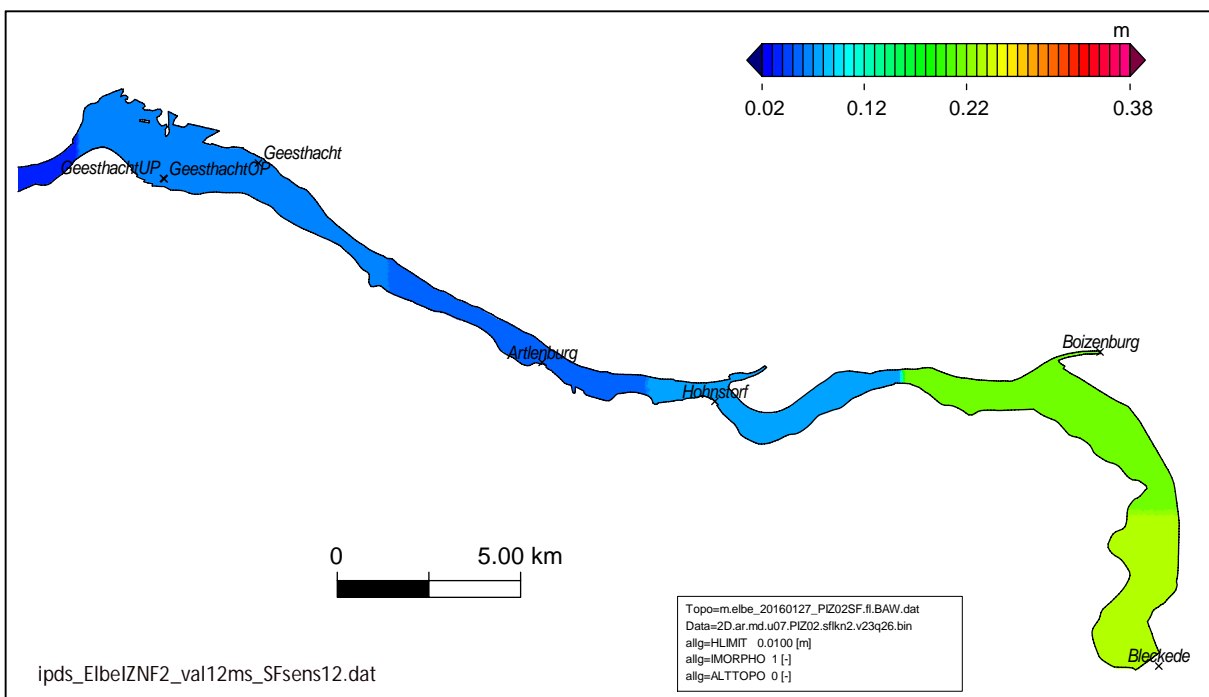


Bild 66: Sensitivitätsstudie Rauheitsverteilung: Effektive Sohlrauheit (auch k_s nach Nikuradse genannt) im verwendeten HN – Modell des Elbeästuares für den Bereich stromauf von Geesthacht. Diese Verteilung (sens12) senkt den Wasserstand stromauf von Geesthacht um ca. 10 cm.

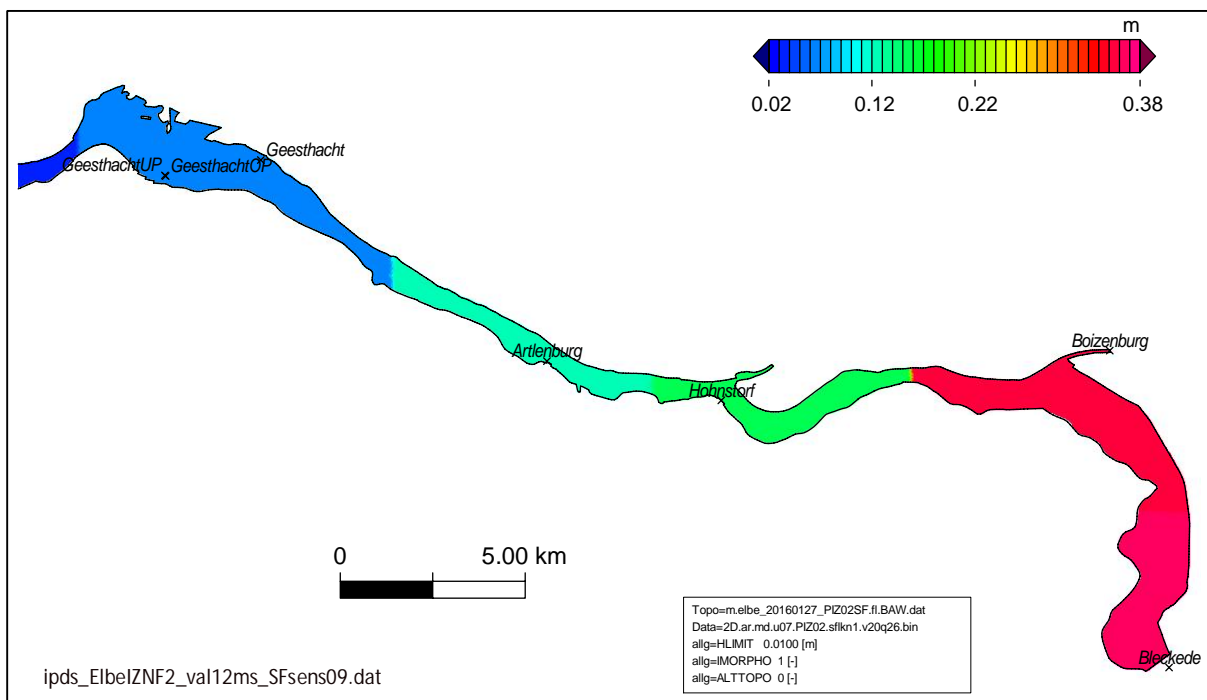


Bild 67: Sensitivitätsstudie Rauheitsverteilung: Effektive Sohlrauheit (auch k_s nach Nikuradse genannt) im verwendeten HN – Modell des Elbeästuares für den Bereich stromauf von Geesthacht. Diese Verteilung (sens09) hebt den Wasserstand stromauf von Geesthacht um ca. 10 cm.

Für das Sturmflutszenario SF94 haben Veränderungen in der effektiven Sohlrauheit stromauf von Geesthacht keinen Einfluss auf die Wasserstände in der Tideelbe sowohl während der Vortide am 27. Januar 1994 als auch im Sturmflutzeitraum am 28. Januar 1994. Beispielhaft zeigen Bild 68 und Bild 69 den Wasserstandsverlauf bei Elbe – km 725 (Cuxhaven) und Elbe – km 623N (Hamburg St. Pauli) unter Verwendung der drei genannten Rauheitsverteilungen (siehe Bild 33, Bild 66 und Bild 67). Die drei modellierten Wasserstandsverläufe (schwarz, hellblau, dunkelblau) liegen im gesamten Zeitraum übereinander. Erst stromauf von Geesthacht bei Elbe – km 574 (siehe Bild 71 bis Bild 74) ist der Einfluss der veränderten Rauheitsverteilung auf den Wasserstand sowohl am Tag vor der Sturmflut als auch im Sturmflutzeitraum zu erkennen.

Große Teile des Vorlandes stromauf von Geesthacht (siehe Bild 32) werden erst im Laufe des 28. Januar 1994 auf Grund der durch die Sturmflut in der Tideelbe erhöhten Wasserstände überflutet. Der Vergleich der gemessenen mit den modellierten Wasserständen aus der Sensitivitätsstudie Rauheitsverteilung lassen vermuten, dass für eine bessere Übereinstimmung zwischen gemessenen und modellierten Wasserständen im Bereich stromauf von Geesthacht eine detailliertere Rauheitsverteilung, die die Unterschiede zwischen Flussbett und Vorland beschreibt, benötigt wird. Da gezeigt werden kann, dass Änderungen in der Rauheitsverteilung in der Mittel- und Unterelbe keinen Einfluss auf die Sturmflutwasserstände in der Unterelbe haben (siehe Bild 82), wird auf die Ableitung einer detaillierteren Rauheitsverteilung für die Mittel- und Unterelbe im Rahmen der hier vorliegenden Untersuchung zu Sturmflutwasserständen in der Tideelbe verzichtet.

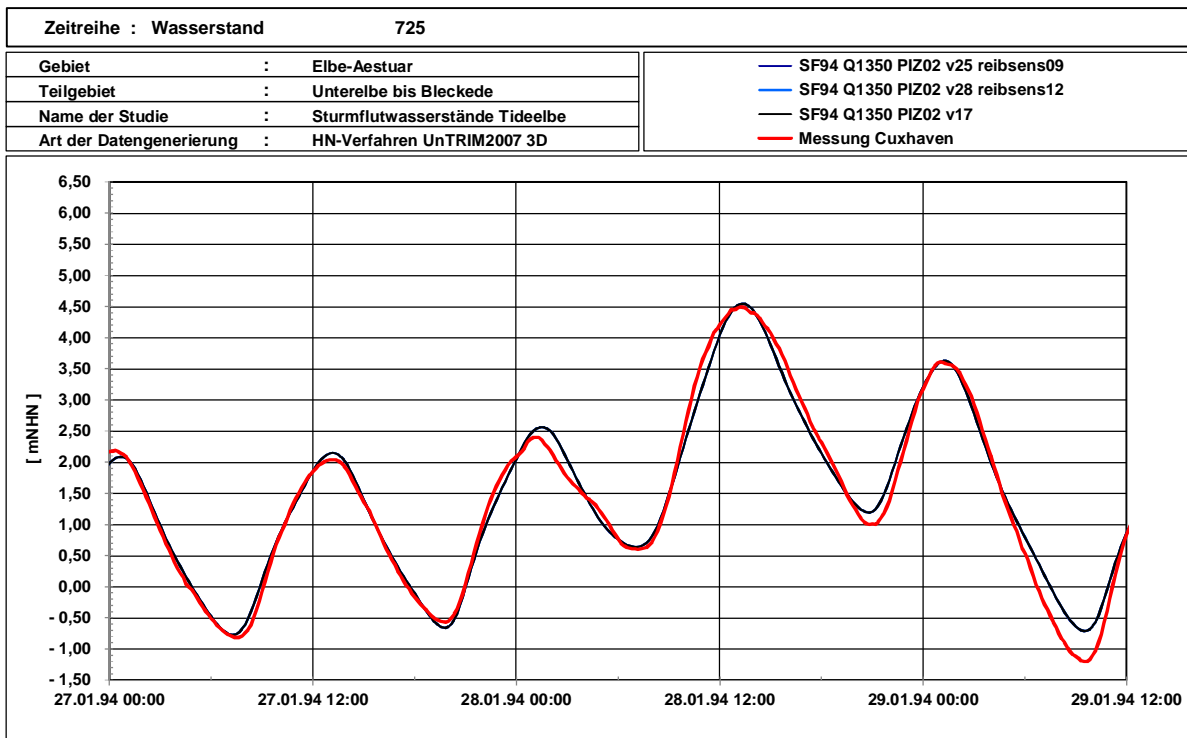


Bild 68: SF94: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 725 (Cuxhaven) während der Sturmflut 28. Januar 1994 mit veränderter Rauheitsverteilung stromauf von Geesthacht. Die Messung ist rot gekennzeichnet.

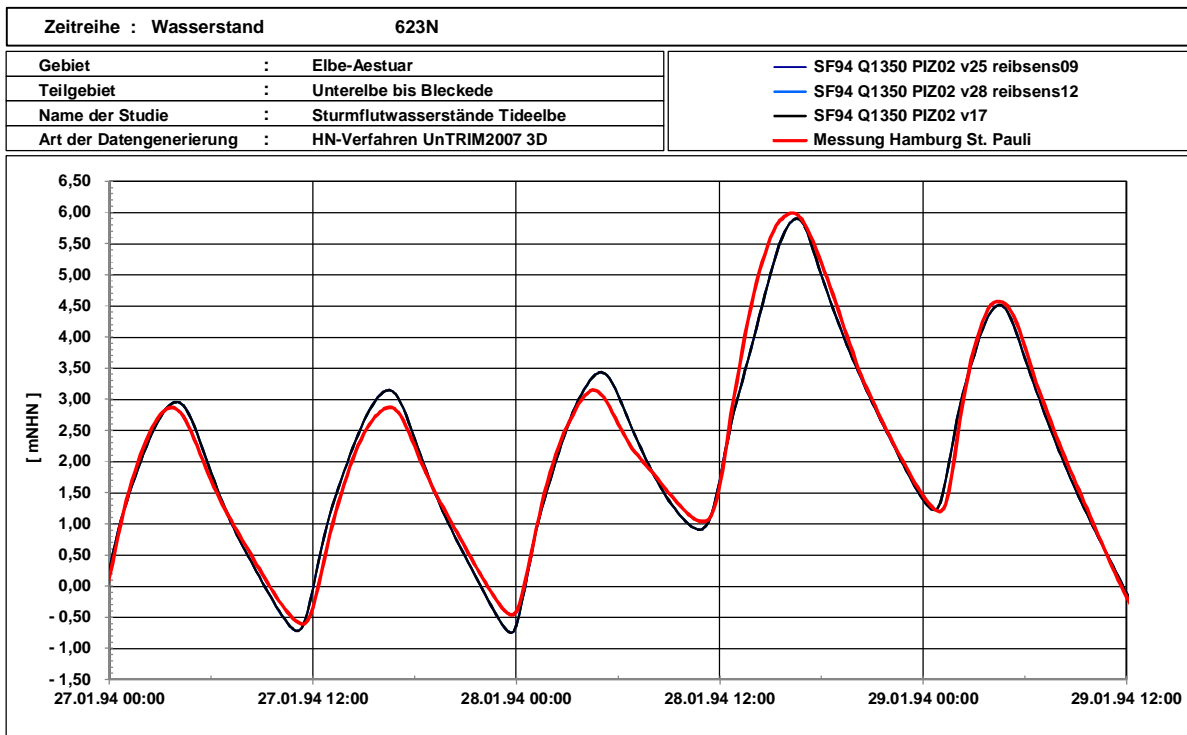


Bild 69: SF94: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 623N (Hamburg St. Pauli) während der Sturmflut 28. Januar 1994 mit veränderter Rauheitsverteilung stromauf von Geesthacht. Die Messung ist rot gekennzeichnet.

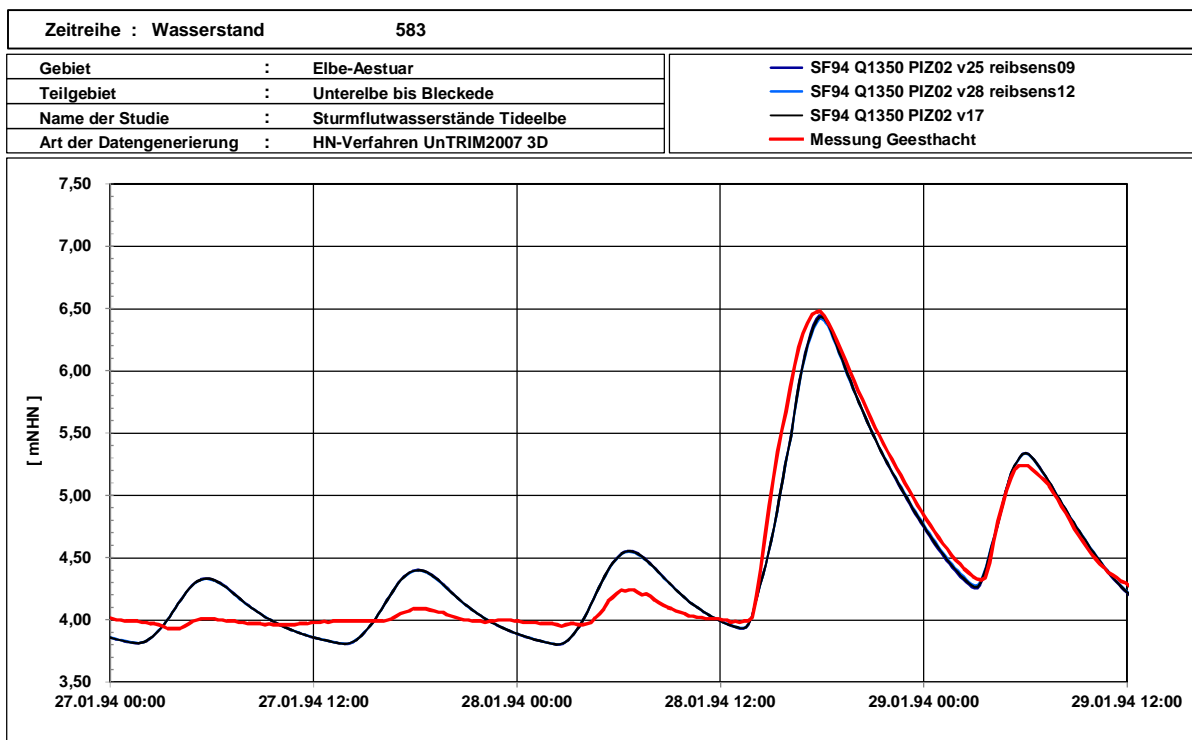


Bild 70: SF94: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 583 (Geesthacht) während der Sturmflut 28. Januar 1994 mit veränderter Rauheitsverteilung stromauf von Geesthacht. Die Messung ist rot gekennzeichnet.

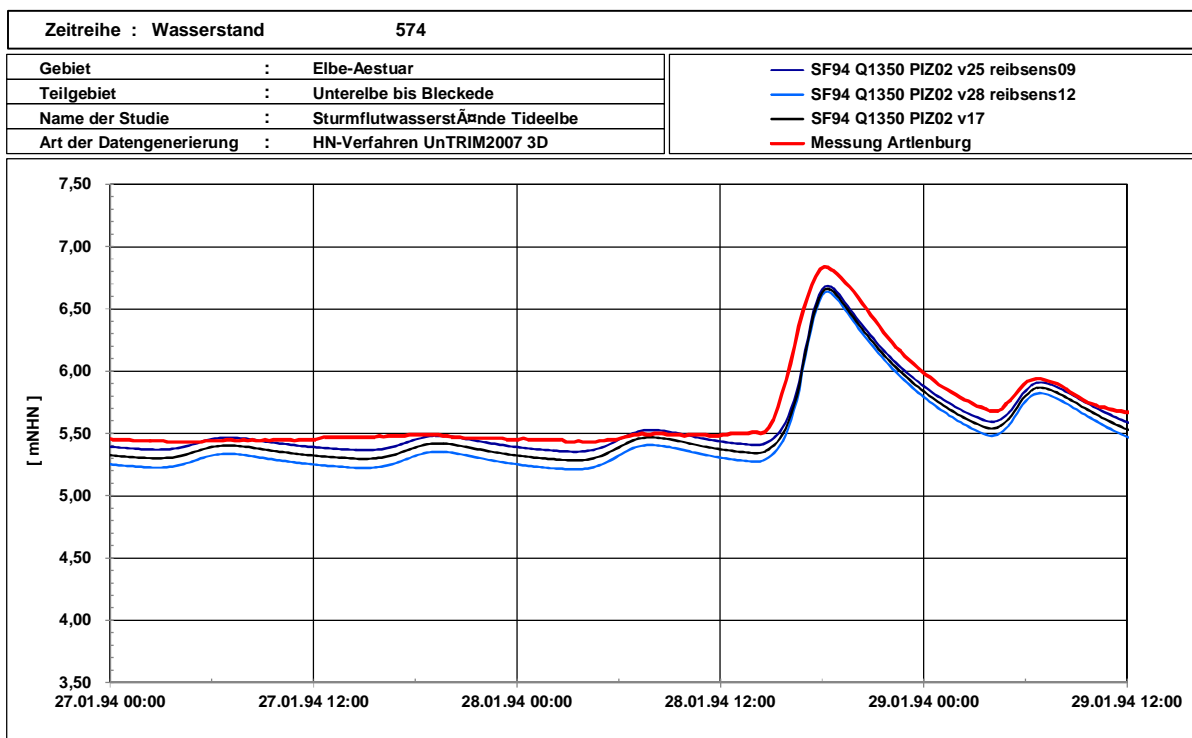


Bild 71: SF94: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 574 (Artlenburg) während der Sturmflut 28. Januar 1994 mit veränderter Rauheitsverteilung stromauf von Geesthacht. Die Messung ist rot gekennzeichnet.

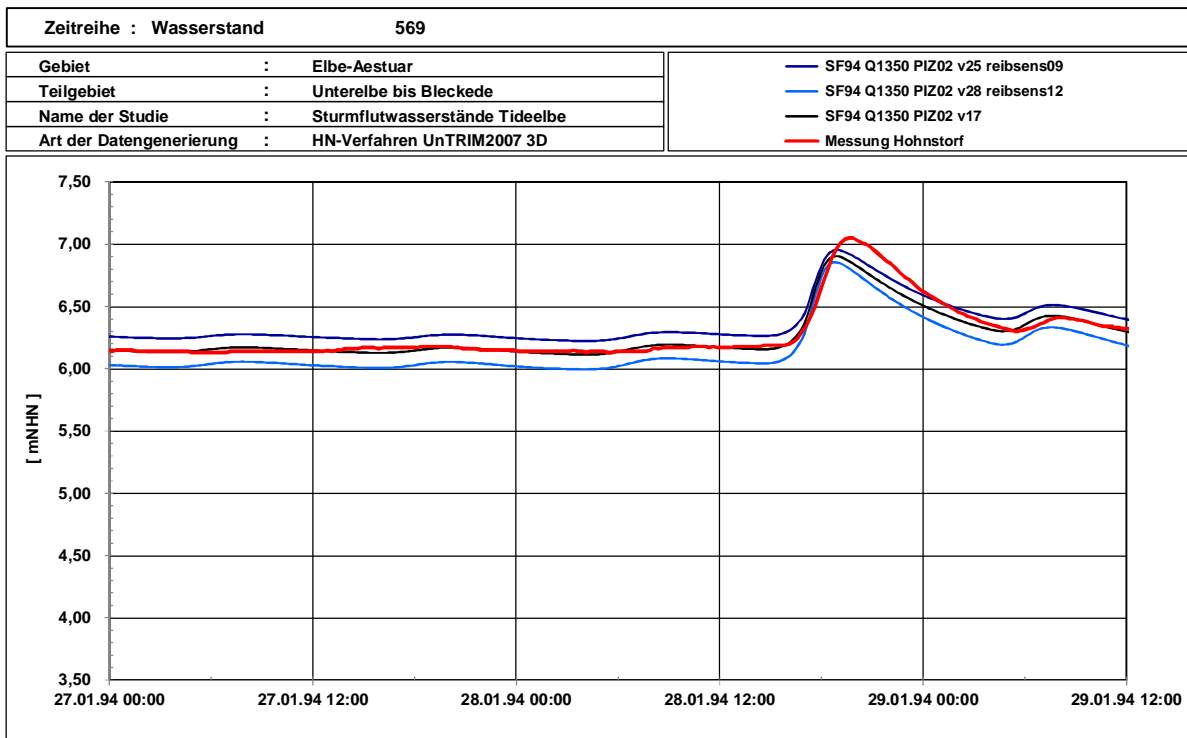


Bild 72: SF94: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 569 (Hohnstorf) während der Sturmflut 28. Januar 1994 mit veränderter Rauheitsverteilung stromauf von Geesthacht. Die Messung ist rot gekennzeichnet.

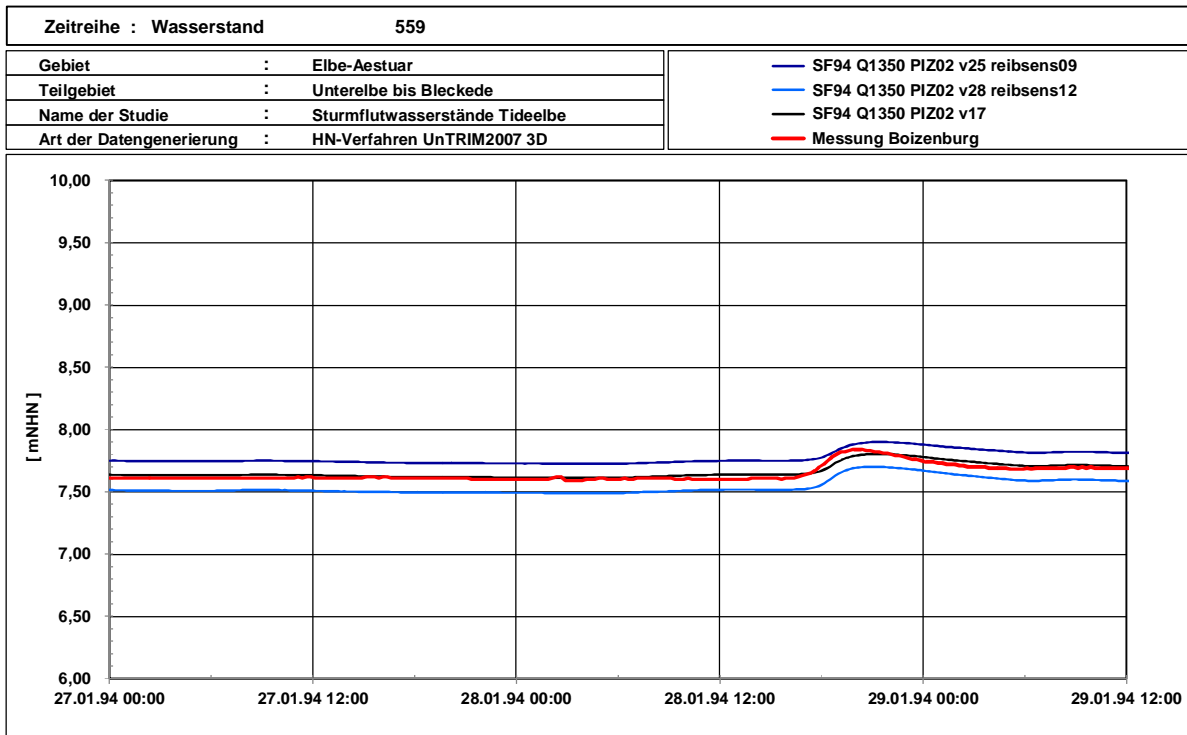


Bild 73: SF94: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 559 (Boizenburg) während der Sturmflut 28. Januar 1994 mit veränderter Rauheitsverteilung stromauf von Geesthacht. Die Messung ist rot gekennzeichnet.

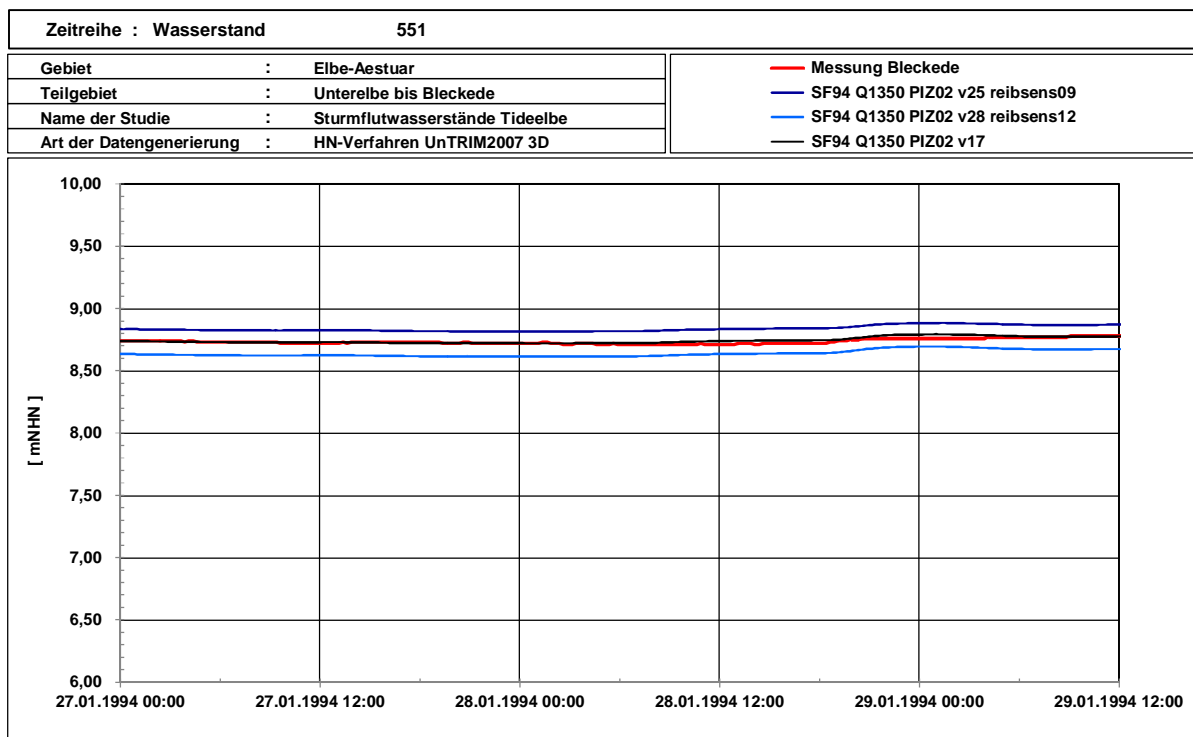


Bild 74: SF94: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 551 (Bleckede) während der Sturmflut 28. Januar 1994 mit veränderter Rauheitsverteilung stromauf von Geesthacht. Die Messung ist rot gekennzeichnet.

Auch für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 haben Veränderungen in der effektiven Sohlrauheit stromauf von Geesthacht keinen Einfluss auf die Wasserstände in der Tidelbe sowohl während der Vortide am 2. Januar als auch im Sturmflutzeitraum am 3. Januar. Beispielhaft zeigen Bild 75 und Bild 76 den Wasserstandsverlauf bei Elbe – km 725 (Cuxhaven) und Elbe – km 623N (Hamburg St. Pauli) unter Verwendung der drei genannten Rauheitsverteilungen (siehe Bild 33, Bild 66 und Bild 67). Die jeweils drei modellierten Wasserstandsverläufe für SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 stimmen im gesamten Zeitraum überein. Erst stromauf von Geesthacht bei Elbe – km 574 (Bild 78 bis Bild 81) ist der Einfluss der veränderten Rauheitsverteilung auf den Wasserstand sowohl am Tag vor der Sturmflut als auch im Sturmflutzeitraum zu erkennen.

Bild 82 zeigt zusammenfassend den Sturmflutscheitelwasserstand HW für die Sturmflutszenarien SF94, SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 entlang der Elbe zwischen der Mündung bei Elbe – km 755 und der Mittelbe bei Elbe – km 550. Die Sensitivitätsstudie Rauheitsverteilung in der Mittelbe zeigt, dass eine Variation der Rauheitsverteilung in der Mittelbe keinen Einfluss auf die Sturmflutscheitelwasserstände der betrachteten Sturmflutszenarien in der Tidelbe hat.

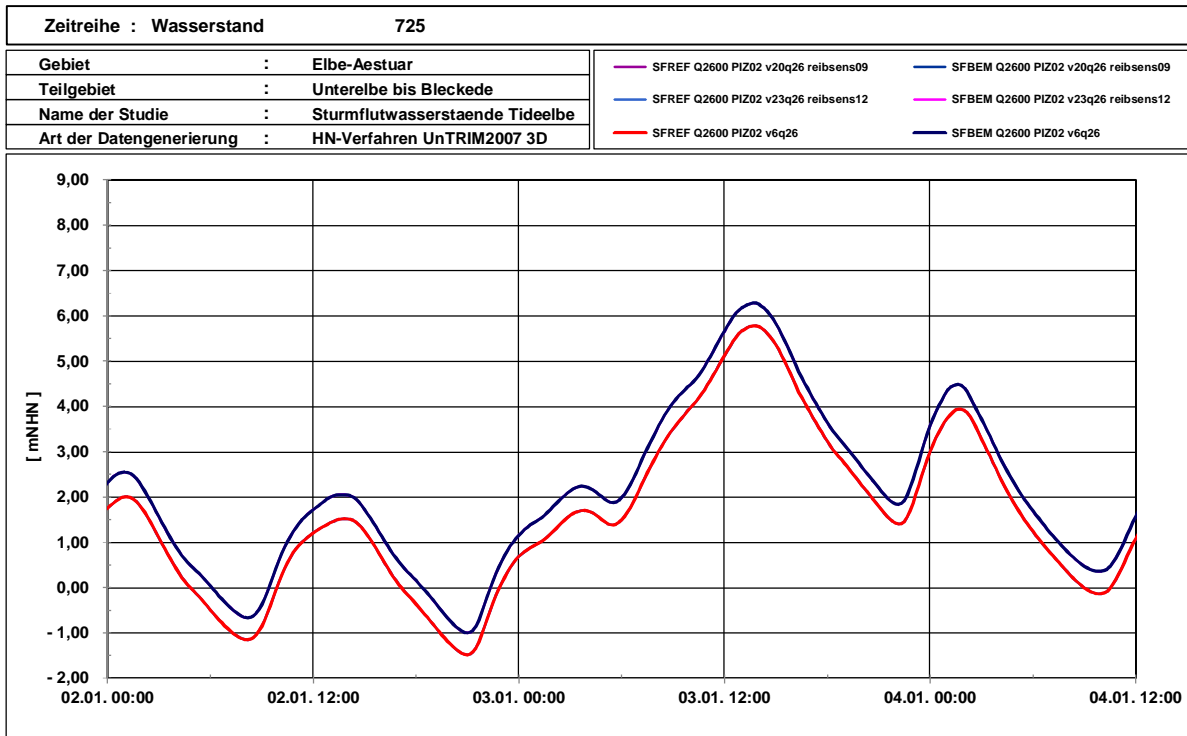


Bild 75: SFREFQ2600 und SFBEMQ2600: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 725 (Cuxhaven) während der Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit veränderter Rauheitsverteilung stromauf von Geesthacht.

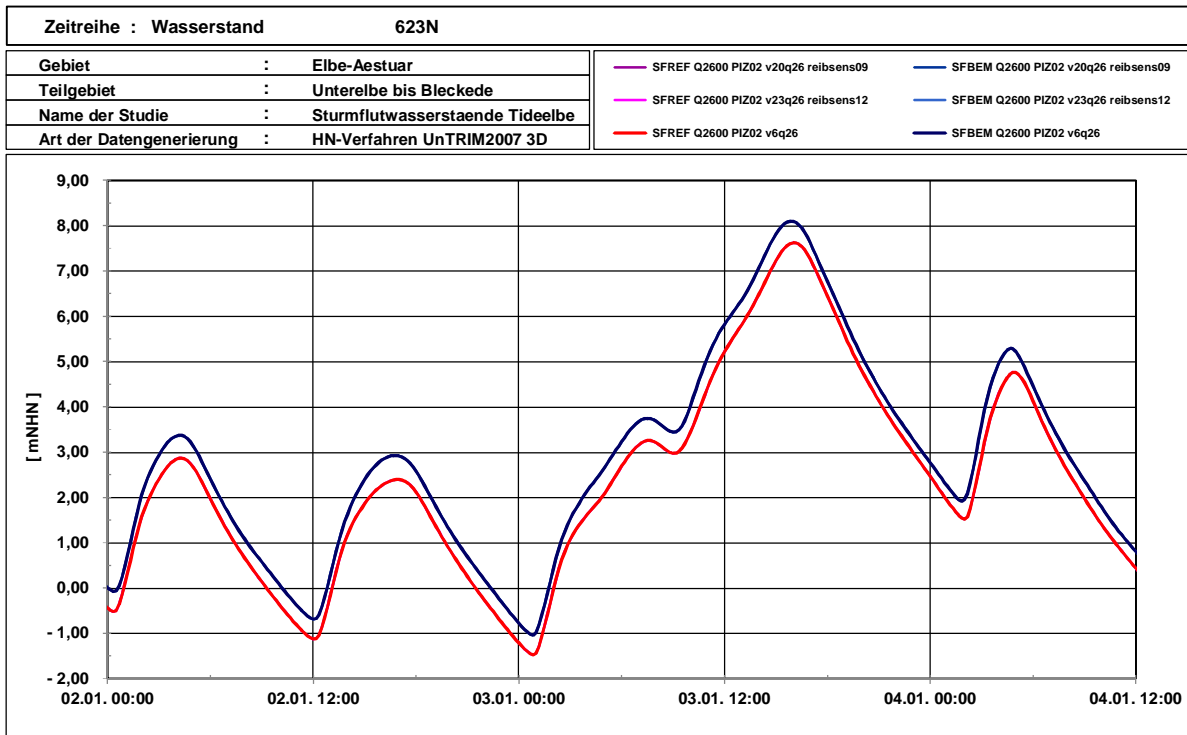


Bild 76: SFREFQ2600 und SFBEMQ2600: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 623N (Hamburg St. Pauli) während der Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit veränderter Rauheitsverteilung stromauf von Geesthacht.

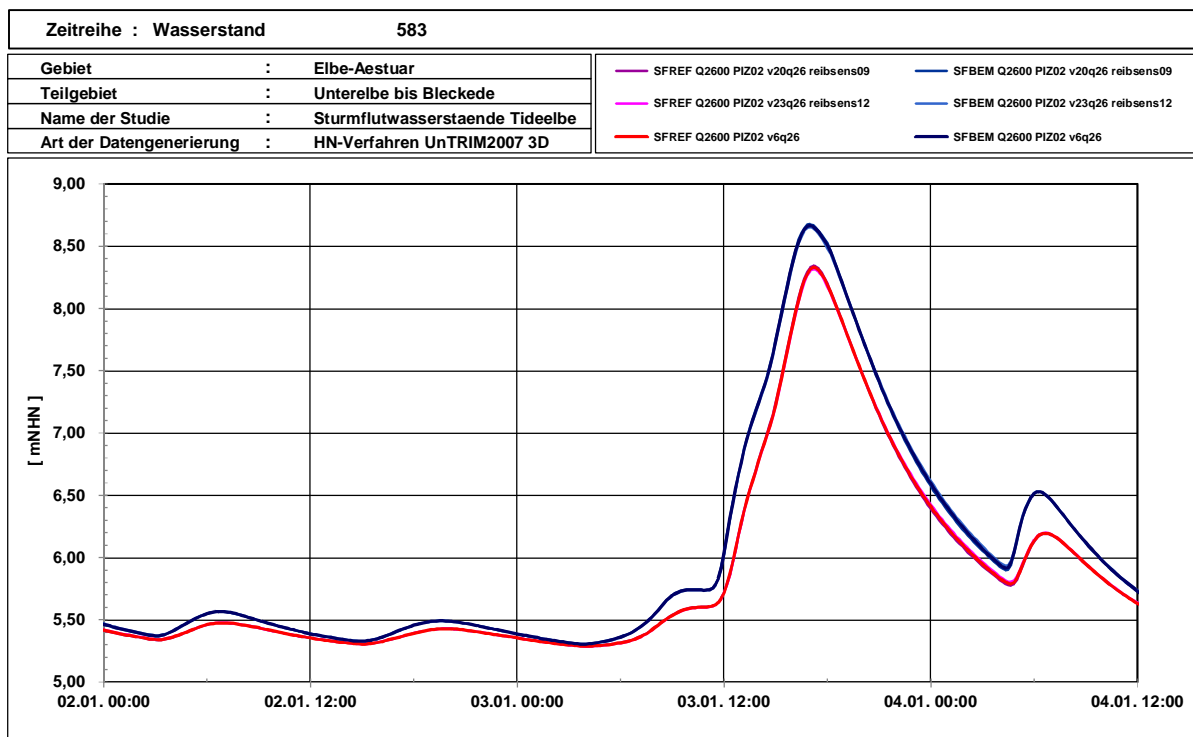


Bild 77. SFREFQ2600 und SFBEMQ2600: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 583 (Geesthacht) während der Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit veränderter Rauheitsverteilung stromauf von Geesthacht.

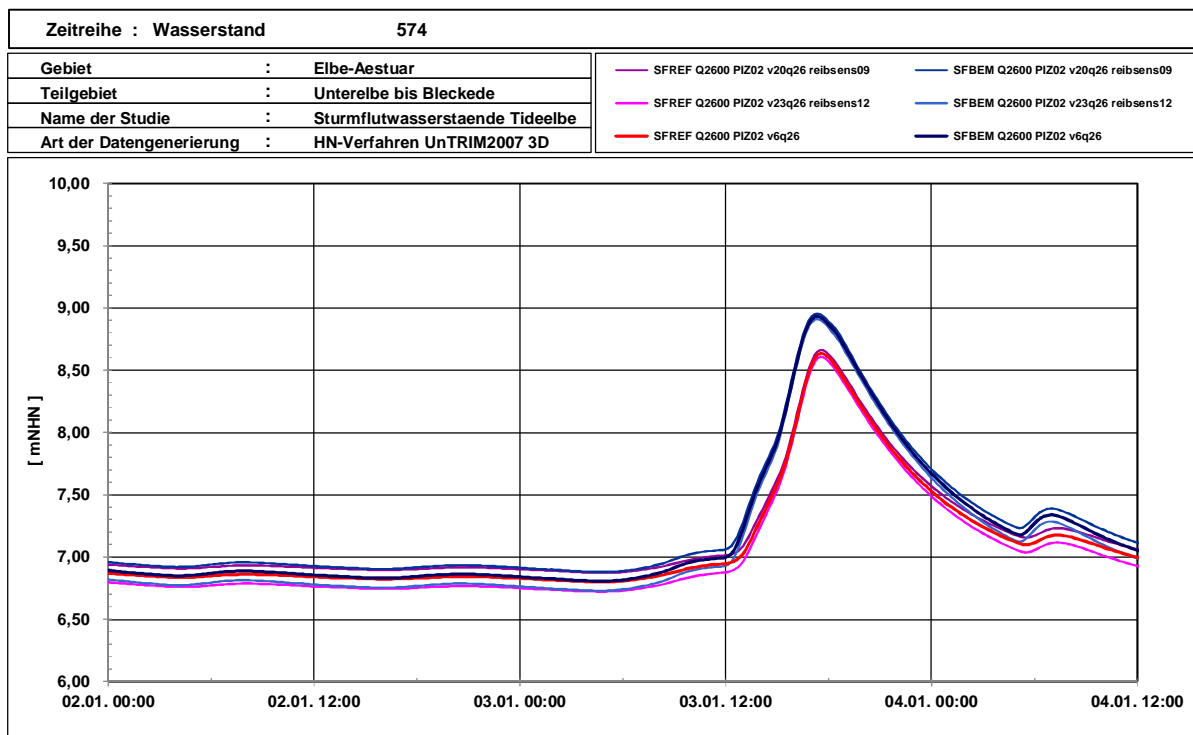


Bild 78: SFREFQ2600 und SFBEMQ2600: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 574 (Artlenburg) während der Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit veränderter Rauheitsverteilung stromauf von Geesthacht.

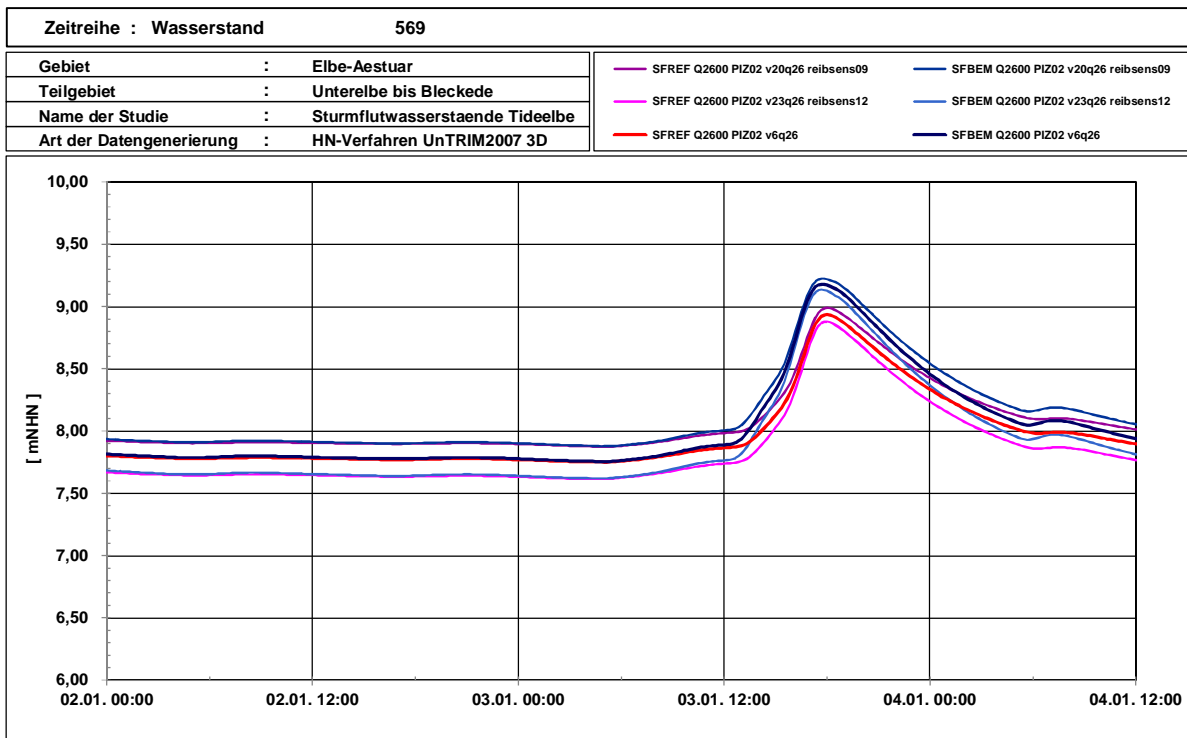


Bild 79: SFREFQ2600 und SFBEMQ2600: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 569 (Hohnstorf) während der Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit veränderter Rauheitsverteilung stromauf von Geesthacht.

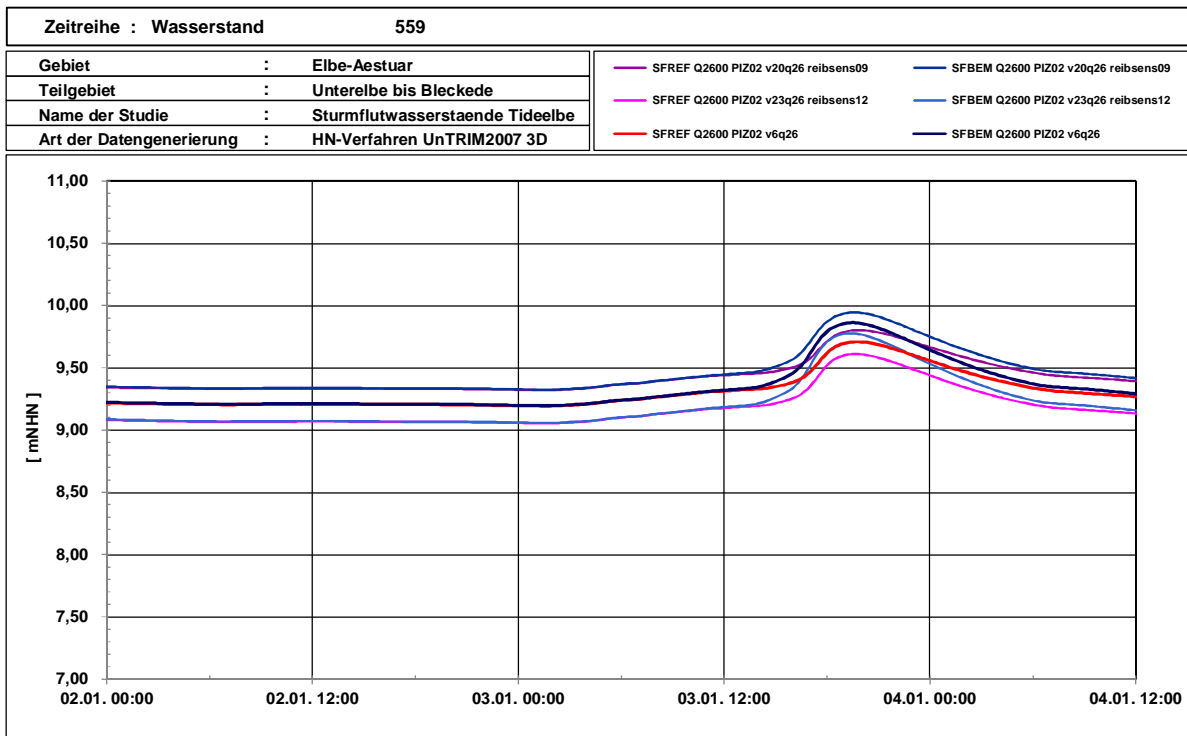


Bild 80: SFREFQ2600 und SFBEMQ2600: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 559 (Boizenburg) während der Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit veränderter Rauheitsverteilung stromauf von Geesthacht.

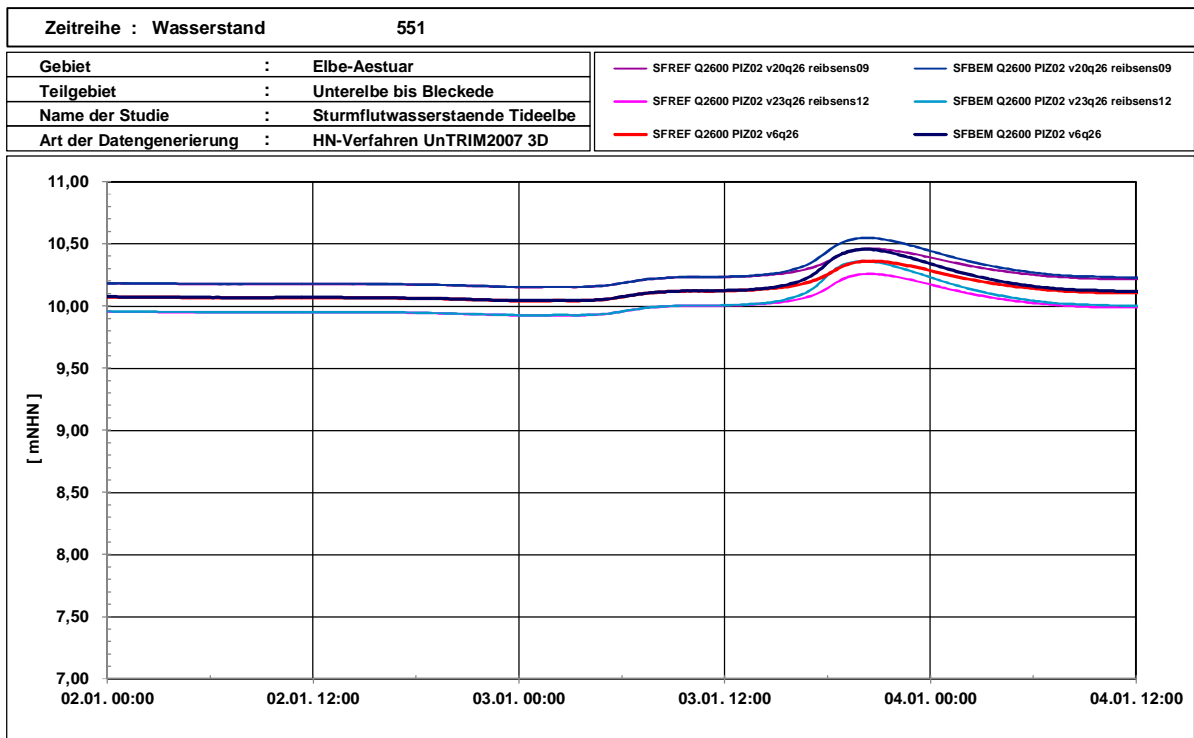


Bild 81: SFREFQ2600 und SFBEMQ2600: Wasserstandsentwicklung bei Elbe – km 551 (Bleckede) während der Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 mit veränderter Rauheitsverteilung stromauf von Geesthacht.

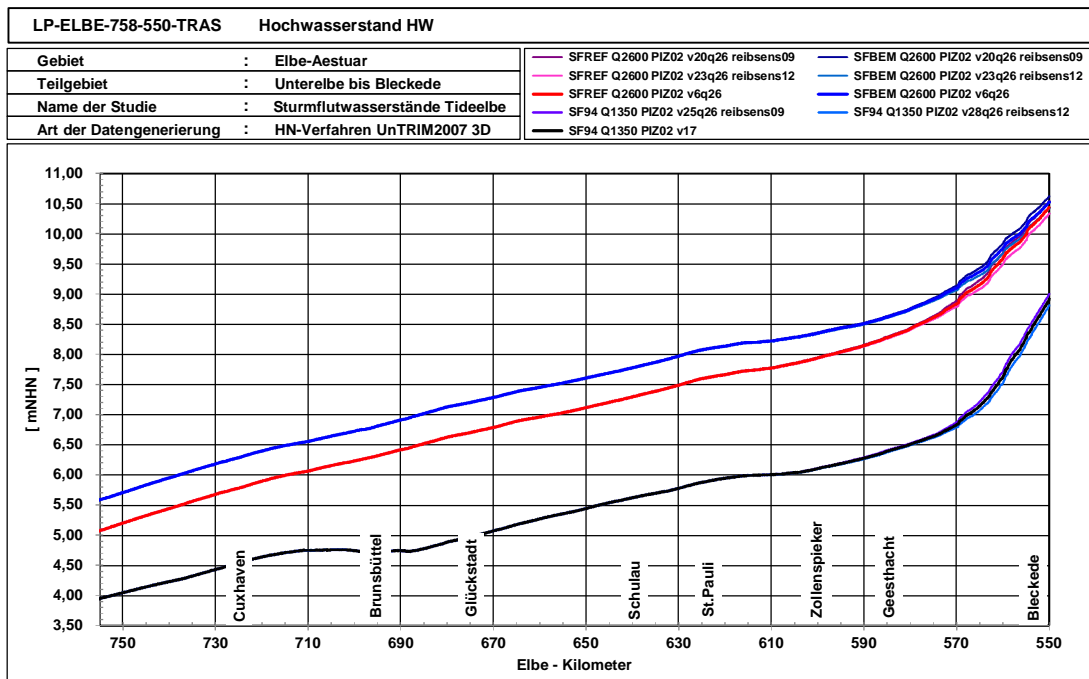


Bild 82: SFREFQ2600, SFBEMQ2600 und SF94: Sturmflutscheitelwasserstand HW entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 755 (Elbmündung bei Bake Z) bis Elbe – km 550 (Bleckede) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 (rot), SFBEMQ2600 (blau) und SF94 (schwarz) sowie die genannten Variationen der Rauheit stromauf von Geesthacht.

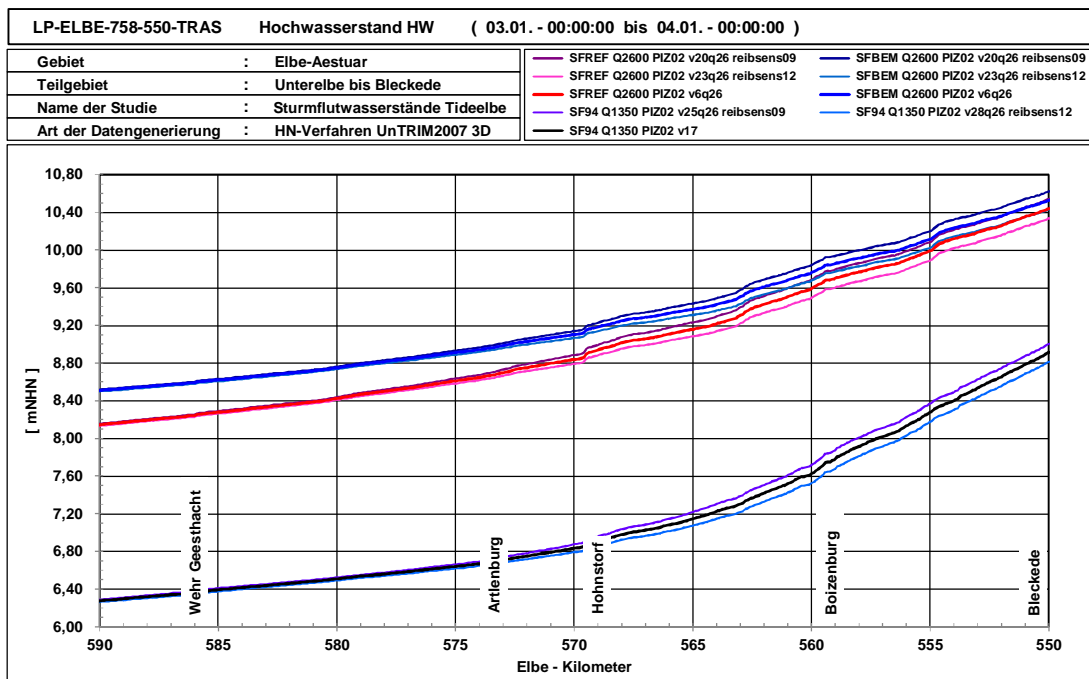


Bild 83: SFREFQ2600, SFBEMQ2600 und SF94: Ausschnitt aus Bild 82: Scheitelwasserstand HW entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 590 (Drennhaus) bis Elbe – km 550 (Bleckede) für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 (rot), SFBEMQ2600 (blau) und SF94 (schwarz) sowie die genannten Variationen der Rauheit stromauf von Geesthacht.

8.7 Teilgebiete: Modelltopographie Planerischer Ist – Zustand PIZ02

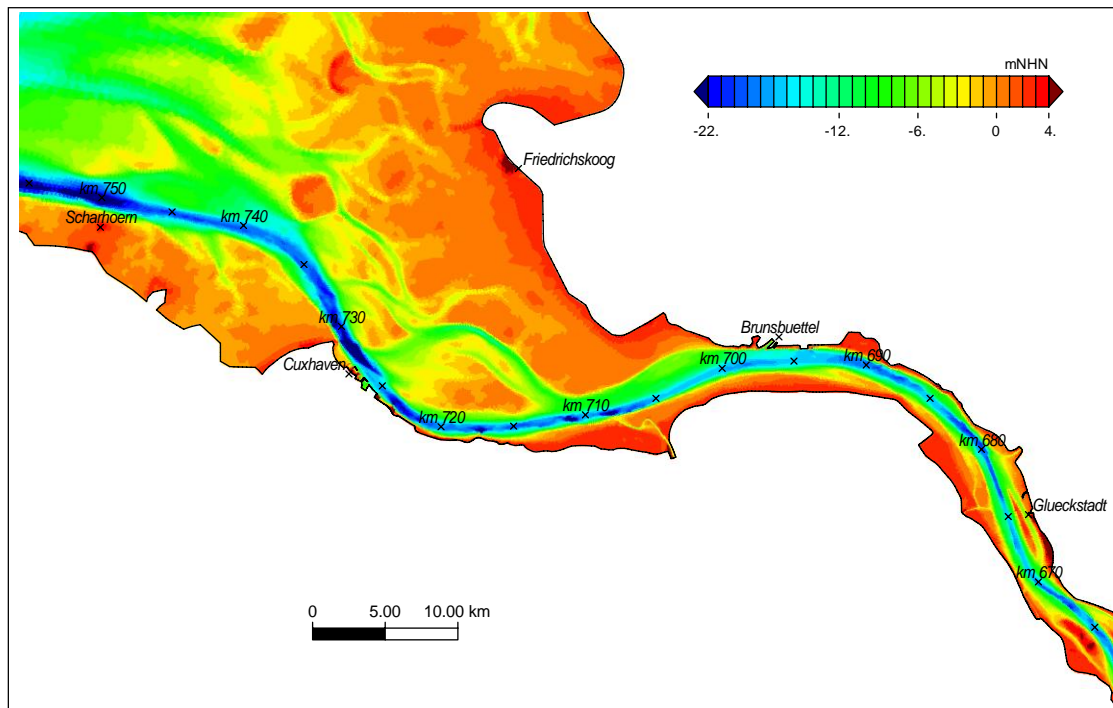


Bild 84: Teilgebiet West: Topographie des numerischen Modells des Elbeästuares der BAW für Sturmflutuntersuchungen (PIZ02, Grundlage: Jahrespeilung 2010).

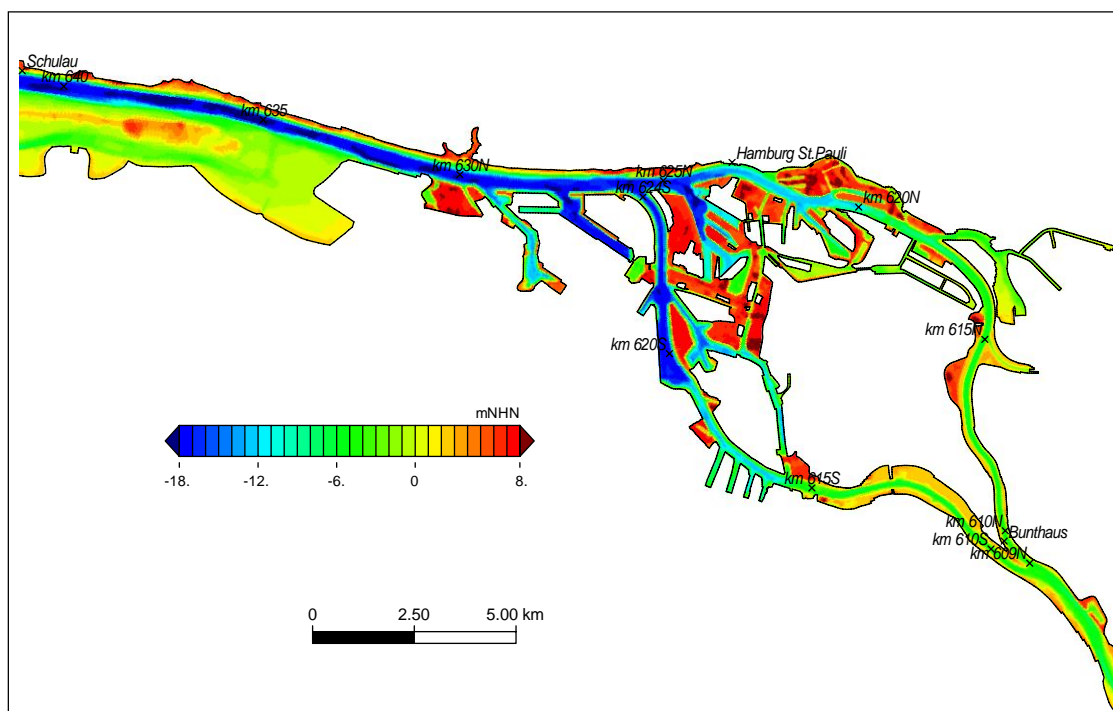


Bild 85: Teilgebiet Hafen: Topographie des numerischen Modells des Elbeästuares der BAW für Sturmflutuntersuchungen (PIZ02, Grundlage: Jahrespeilung 2010).

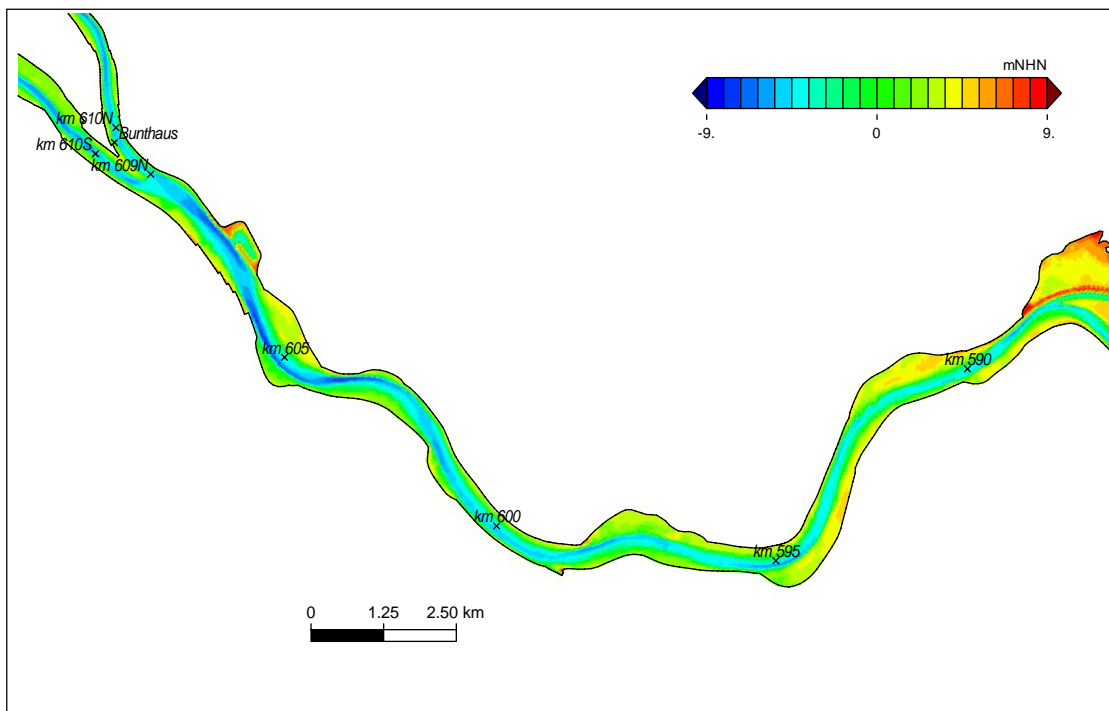


Bild 86: Teilgebiet Ost: Topographie des numerischen Modells des Elbeästuares der BAW für Sturmflutuntersuchungen (PIZ02, Grundlage: Jahrespeilung 2010).



Kußmaulstraße 17 · 76187 Karlsruhe
Tel. +49 (0) 721 97 26-0 · Fax +49 (0) 721 97 26-45 40

Wedeler Landstraße 157 · 22559 Hamburg
Tel. +49 (0) 40 81 908-0 · Fax +49 (0) 40 81 908-373

www.baw.de